

Aus dem Institut für Physiologie und Anatomie  
der Deutschen Sporthochschule Köln  
Geschäftsführender Leiter: Professor Dr. med. Otmar Bock

# **Einflussgrößen auf die sensomotorische Adaptation Kognition und Propriozeption**

von der Deutschen Sporthochschule Köln  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Sportwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Katja Pipereit  
aus Osnabrück

Köln 2005

Erster Referent:	Professor Dr. Otmar Bock
Zweiter Referent:	Professor Dr. Hans-Joachim Appell
Vorsitzender des Promotionsausschusses:	Professorin Dr. Ilse Hartmann-Tews
Tag der mündlichen Prüfung:	16.12.2005

Hierdurch versichere ich an Eides statt: Ich habe diese Dissertation selbstständig und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen angefertigt; sie hat noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegen. Wörtlich übernommene Textstellen, auch Einzelsätze oder Teile davon, sind als Zitate kenntlich gemacht.

Köln, im Oktober 2005

---

Katja Pipereit

Teile dieser Arbeit sind bereits, mit Einverständnis des ehemaligen Vorsitzenden des Promotionsausschusses Herrn Prof. Dr. H.-D. Horch, bei der Zeitschrift *Experimental Brain Research* zur Veröffentlichung eingereicht und auf folgenden Kongressen als Posterpräsentation veröffentlicht worden:

32<sup>nd</sup> Annual Meeting of the Society for Neuroscience, Orlando (2002)

Symposium „Neuro-Visionen – Perspektiven in NRW“, Düsseldorf (2003)

6<sup>th</sup> IBRO World Congress of Neuroscience, Prag (2003)

Symposium „Neuro-Visionen 2 – Perspektiven in NRW“, Düsseldorf (2004)

6th Meeting of the German Neuroscience Society, Göttingen (2005)

European Workshop Of Movement Science, Wien (2005)

Pipereit K, Bock O, Vercher JL (akzeptiert, in Revision) The contribution of proprioceptive feedback to sensorimotor adaptation. *Exp Brain Res*

Diese Arbeit wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen 50WB9942) und mit Mitteln der DFG (Förderkennzeichen BO 649/8) gefördert.

## Abkürzungsverzeichnis

EA	Einzelaufgabe
FB	Folgebewegung
DA	Doppelaufgabe
KTR	Kontrolle
L / R	links / rechts
LA	Lernaufgabe
n.s.	nicht signifikant
RA	Reaktionsaufgabe
RM	Rückmeldung
RMS-Fehler	Root Mean Square-Fehler
V / H	vorne / hinten
V <sub>kompo</sub>	Kompositions-vorteil
V <sub>deko</sub>	Dekompositions-vorteil
VIB	Vibration
ZA	Zweitaufrage
ZB	Zeigebewegung

## Gleichungsverzeichnis

Gl. 1:	Gleichung für die Berechnung des $\Delta$ RMS-Fehlers.....	35
Gl. 2:	Gleichung für die Berechnung des prozentualen Transfers.....	43
Gl. 3:	Gleichung für die Berechnung des Kompositions- und Dekompositions-vorteils.....	54

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Überblick über die Probanden der einzelnen Experimente.....	29
Tab. 2:	Ablauf des Experiments A.....	42
Tab. 3:	Ablauf des Experiments B.....	53
Tab. 4:	Ablauf des Experiments C am zweiten Tag.....	65
Tab. 5:	Ablauf des Experiments D am zweiten Tag.....	74
Tab. 6:	Ablauf des Experiments F.....	88
Tab. 7:	Ablauf des Experiments G.....	94

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung der beiden Varianten des Versuchsaufbaus...	30
Abb. 2: Aufbau des DA-Experiments mit Zeigebewegungen.....	34
Abb. 3: Rohdaten von Bewegungen des Zielpunkts und des Fadenkreuzes.....	35
Abb. 4: Rohdaten von Bewegungen des Fadenkreuzes bei Zeigebewegungen....	36
Abb. 5: Darstellung der Berechnung des Fehlerwinkels bei Zeigebewegungen....	36
Abb. 6: Beispiel einer Anpassungsfunktion.....	38
Abb. 7: Gruppeneinteilung am ersten Testtag.....	41
Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers der vier Gruppen A-D.....	43
Abb. 9: Ergebnis des Post hoc-Tests.....	44
Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers der beiden Gruppen $-45^\circ$ und $+45^\circ$ ....	45
Abb. 11: Prozentualer Transfer auf das ungeübte Feld.....	46
Abb. 12: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus in Experiment B.....	52
Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers der vier Gruppen.....	55
Abb. 14: Zeitlicher Verlauf der linearen Distanz der vier Gruppen.....	56
Abb. 15: Zeitlicher Verlauf der Maximalgeschwindigkeit der vier Gruppen.....	57
Abb. 16: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers aller Probanden am zweiten Tag.....	66
Abb. 17: Verlauf der $\Delta$ RMS-Fehler Experiment C.....	67
Abb. 18: Verlauf der Reaktionszeiten der verschiedenen RA Experiment C.....	68
Abb. 19: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers am zweiten Tag Experiment D.....	75
Abb. 20: Verlauf der $\Delta$ Zeigefehler Experiment D.....	76
Abb. 21: Verlauf der Reaktionszeiten der verschiedenen RA Experiment D.....	77
Abb. 22: Sitz der Vibratoren.....	82
Abb. 23: Im Experiment benutzte Formen.....	83
Abb. 24: Ergebnisse des Erfühlens von Formen.....	84
Abb. 25: Ergebnisse der Druckeinschätzung.....	85
Abb. 26: Ergebnisse der Winkelreproduktion.....	86
Abb. 27: Zeitlicher Verlauf des initialen Zeigefehlers der beiden Gruppen.....	89
Abb. 28: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung des initialen Zeigefehlers (F)	90
Abb. 29: Darstellung des Roboteraufbaus.....	93
Abb. 30: Rohdaten der Zeigebewegungen.....	95
Abb. 31: Verlauf des initialen Zeigefehlers Experiment G.....	95
Abb. 32: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung des initialen Zeigefehlers (G)	97

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motorisches Lernen.....	1
1.2	Mechanismen der sensomotorischen Adaptation.....	3
1.2.1	Strategische Anpassung und Rekalibrierung.....	6
1.2.2	Auswirkungen aufeinander folgender Adaptationsvorgänge.....	8
1.3	Phasen des motorischen Lernens und die Doppelaufgaben-Methode.....	15
1.4	Rolle der Propriozeption bei der sensomotorischen Adaptation.....	20
1.4.1	Die Propriozeption.....	21
1.4.2	Einfluss der Propriozeption auf die sensomotorische Adaptation.....	21
1.5	Intention dieser Arbeit.....	25
2	Experimente.....	28
2.1	Experimentübergreifende Methodik.....	28
2.1.1	Versuchspersonen.....	28
2.1.2	Versuchsaufbau.....	29
2.1.3	Versuchsablauf.....	30
2.1.4	Auswertung.....	34
2.2	Vorexperimente.....	40
2.2.1	Einfluss der Zielpunktverteilung bei Zeigebewegungen.....	40
2.2.1.1	Spezielle Methodik.....	40
2.2.1.2	Ergebnisse.....	43
2.2.1.3	Diskussion.....	46
2.2.2	Erprobung eines elastischen Stabes als elastische Störung.....	51
2.2.2.1	Spezielle Methodik.....	52
2.2.2.2	Ergebnisse.....	55
2.2.2.3	Diskussion.....	58
2.3	Experimente zur Kognition.....	63
2.3.1	Ressourcenbedarf bei einer Doppelaufgabe mit Folgebewegungen.....	63
2.3.1.1	Spezielle Methodik.....	64
2.3.1.2	Ergebnisse.....	66
2.3.1.3	Diskussion.....	69

2.3.2 Ressourcenbedarf bei einer Doppelaufgabe mit Zeigebewegungen.....	72
2.3.2.1 Spezielle Methodik.....	72
2.3.2.2 Ergebnisse.....	75
2.3.2.3 Diskussion.....	78
2.4 Experimente zur Propriozeption.....	81
2.4.1 Auswirkung von Vibration auf die propriozeptive Rückmeldung.....	81
2.4.1.1 Methodik und Ergebnisse.....	81
2.4.1.2 Diskussion.....	86
2.4.2 Auswirkung von Vibration auf die Adaptation an eine visuelle Störung.....	87
2.4.2.1 Spezielle Methodik.....	87
2.4.2.2 Ergebnisse.....	88
2.4.2.3 Diskussion.....	90
2.4.3 Auswirkung von Vibration auf die Adaptation an eine mechanische Störung	93
2.4.3.1 Spezielle Methodik.....	93
2.4.3.2 Ergebnisse.....	94
2.4.3.3 Diskussion.....	97
3 Experimentübergreifende Diskussion.....	100
3.1 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick.....	100
3.2 Kritische Betrachtung der Methodik.....	106
3.3 Praktische Relevanz.....	107
4 Zusammenfassung.....	110
5 Literaturverzeichnis.....	112
6 Anhang.....	120

# 1 Einleitung

Die Aneignung kognitiver und motorischer Fähig- und Fertigkeiten spielt in der Entwicklung des Menschen eine zentrale Rolle. Nicht nur im Sport sondern auch in vielen anderen alltäglichen und beruflichen Situationen müssen neue Dinge und Bewegungen erlernt oder bereits bekannte verändert oder verbessert werden. So erfordern wechselnde Pistenqualitäten beim Skifahren ebenso eine ständige Anpassung wie das Laufen auf verschiedenen Untergründen oder die Benutzung eines Touch-Pads eines neuen Laptops anstatt der gewohnten Maus.

Für jeden von uns ist es demnach normal, Bewegungsabläufe neu zu erlernen oder anzupassen. Oft geschieht das nebenbei und unbewusst. Aber was geht dabei vor sich? Wie läuft dieses Lernen ab und wovon wird es beeinflusst? Hat das, was wir früher gelernt haben, einen Einfluss auf das Lernen neuer Dinge? Zu einigen dieser Fragen gibt es wissenschaftliche Untersuchungen, doch sowohl viele Mechanismen des Lernens als auch Einflussfaktoren auf das Lernen sind bis heute noch unklar. Mit den einzelnen Experimenten dieser Arbeit werden Grundlagen des motorischen Lernens untersucht, vor allem im Hinblick auf die Rolle der Kognition und der Propriozeption.

In dieser Einleitung werden zunächst alle für diese Arbeit wichtigen Aspekte erläutert und relevante bisherige Studien beschrieben und diskutiert. Im Anschluss daran wird die Intention dieser Arbeit definiert und die sich daraus ergebenden Fragestellungen vorgestellt.

## 1.1 Motorisches Lernen

Das motorische Lernen ist ein komplexeres Gebiet, als von vielen angenommen wird. Dieses macht die Aussage von Pöhlmann (1994, S.11) deutlich: „Es ist nicht richtig zu glauben, daß man über (motorisches) Lernen alles weiß, nur weil man in der frühen Kindheit gelehrt wurde, die Schuhe richtig zu schnüren und es trotz zunehmender Mühen auch jetzt noch selbst kann.“ Das motorische Lernen wird von vielen Autoren beschrieben und dabei auf unterschiedliche Art definiert. Gemeinsam ist den meisten



Definitionen die Nennung interner Prozesse, die auf Übung und Erfahrung beruhen und relativ dauerhaft sind (Meinel und Schnabel 1998; Schmidt und Lee 1999). Die Lernprozesse können dabei implizit und explizit ablaufen. Implizite Prozesse laufen ohne die Beteiligung des Bewusstseins ab, also ohne direkten Zugriff auf bereits vorhandene Gedächtnisinhalte. Als explizites Lernen wird dagegen die bewusste Auseinandersetzung mit den Lerninhalten bezeichnet. Beide Prozesse können isoliert, aber auch kombiniert vorkommen, wie in der Einteilung von Leonard (1998) deutlich wird, der zwischen vier verschiedenen Arten des motorischen Lernens unterscheidet. Zuerst nennt er die *Adaptation*, welche die Fähigkeit eines Individuums beschreibt, eine motorische Antwort als Reaktion auf veränderte sensorische Informationen in der Umwelt anzupassen. Dies kann entweder bewusst geschehen oder automatisch und unbewusst, wie es häufig der Fall ist, z. B. nach Verschreibung einer neuen Brille. Als zweites nennt Leonard die *konditioniert-assoziativen Antworten*. Diese Art des Lernens bezeichnet er als adaptiv und automatisch. Ein Beispiel dieser Lernart ist der Pavlow'sche Hund, der gelernt hat, das Klingeln einer Glocke mit der Fütterung zu verbinden. Nach einer Lernphase war er so konditioniert, dass bereits das Glockenklängen für seinen Speichelfluss ausreichte. Das *nicht-assoziative Lernen* beinhaltet Gewöhnung und Sensibilisierung auf wiederholte Reize. Hierbei wird die Unterdrückung einer Antwort auf einen Reiz als Gewöhnung bezeichnet, und die Verstärkung einer Antwort auf einen Reiz als Sensibilisierung, wobei letzteres häufig mit Schmerzen assoziiert wird. Das *Erlernen motorischer Fertigkeiten* nennt Leonard als vierte Form. Gemeint ist damit die Formierung neuer Bewegungssequenzen mit dem Ziel schneller, genauer und effizienter zu werden. Letzteres ist die komplexeste Art des motorischen Lernens und umfasst häufig auch einige der mit den anderen Lernarten verbundenen Mechanismen.

Im täglichen Leben ist es nicht immer leicht, diese verschiedenen Formen des motorischen Lernens exakt voneinander zu trennen. Handelt es sich beim Erlernen des In-line-Skatens z. B. um das Erlernen einer neuen Fertigkeit oder ist es „nur“ die Adaptation an die Rollen? In dieser Arbeit werden die Begriffe Adaptation und motorisches Lernen synonym benutzt.

Ein wichtiger und häufig diskutierter Faktor beim motorischen Lernen ist die Rückmeldung. Hierbei wird zwischen der exterozeptiven und der propriozeptiven Rück-

meldung unterschieden (Schmidt 1991). Erstere beinhaltet Informationen, die von außerhalb des Körpers kommen, wobei die wichtigste die visuelle Rückmeldung ist. Letztere beinhaltet die Sammlung aller sensorischer Informationen aus unserem Körper, wie z. B. die relative Position und Bewegung von Gelenken, die Spannung in Muskeln und die Orientierung im Raum. Körperbewegungen können im offenen Regelkreis (open-loop) oder im geschlossenen Regelkreis (closed-loop) erfolgen. Auf der einen Seite gibt es Bewegungen, die auf Grund der kurzen Zeitspanne, in der sie ablaufen, nicht während der Ausführung angepasst werden können. Diese werden als open-loop bezeichnet (Pew 1966; Schmidt 1976). Es findet also keine direkte Verbesserung mit Hilfe der Rückmeldung statt. Beispiele solcher ballistischer, nur den Bruchteil einer Sekunde dauernder, unkorrigierter Bewegungen sind fast alle Aktionen im Fecht sport, besonders aber Paraden, bei denen man den Ablauf nicht selbst plant, sondern nur auf Aktionen des Gegners reagiert. Für gut bekannte Situationen scheinen demnach motorische Programme zur Verfügung zu stehen, die dann ohne Einflussnahme ablaufen. Zu diesem Bereich gehören sowohl ballistische Bewegungen wie Zeigebewegungen als auch Bewegungen ohne visuelle Rückmeldung. Auf der anderen Seite gibt es die closed-loop Bewegungen, bei denen einmal erlernte Bewegungen eine Spur hinterlassen, die ständig mit dem Handlungsergebnis verglichen und verändert werden kann (Pew 1966; Adams 1971; Schmidt 1976). Besteht eine Diskrepanz zwischen dem Soll- und dem Istwert, wird die Spur solange modifiziert, bis sie übereinstimmen. Da dieses während der Bewegung geschieht, spielt die visuelle Rückmeldung eine entscheidende Rolle. Es handelt sich somit um einen geschlossenen Regelkreis wie er z. B. bei Folgebewegungen mit visueller Rückmeldung vorkommt. Bei der Erklärung von Bewegungshandlungen können diese beiden Theorien allerdings meistens nicht voneinander getrennt werden, sondern es sind gleichzeitig sowohl Anteile von Programmsteuerung (open-loop Modell) als auch von willkürlicher Steuerung (closed-loop Modell) vorhanden.

## **1.2 Mechanismen der sensomotorischen Adaptation**

Die Anpassung von Bewegungen an neue Situationen geschieht auf Grund der Rückmeldung, die z. B. visuell, auditiv oder propriozeptiv sein kann. Kommt es durch

eine Störung zu einer Abweichung der Rückmeldung von der beabsichtigten Bewegung, so führt dies zu einer Änderung des Verhaltens. Die Speicherung der an die neue Situation angepassten Bewegung findet dabei nach Meinung einiger Autoren nicht einfach nur im motorischen Gedächtnis statt. Sie umschreiben die neuronalen Repräsentationen des Gelernten mit der Metapher eines *internen Modells* (Shadmehr und Mussa-Ivaldi 1994; Wolpert et al. 1995; Flanagan et al. 1999; Krakauer et al. 1999; Imamizu et al. 2000; Ito 2000). Da die Metapher interner Modelle jedoch die Vorstellung konkreter, abgegrenzter Modelle hervorruft, kann diese Beschreibung besser durch den deskriptiven Begriff der *sensomotorischen Transformationsregeln* (Bock et al. 2005c) ersetzt werden. Sie sorgen gewissermaßen dafür, dass eine beabsichtigte Bewegung mit Hilfe eines gespeicherten Musters von Kräften und Drehmomenten, die auf die beteiligte Muskulatur wirken, entsteht. Solche Regeln bleiben lange im Gedächtnis erhalten und stehen dem motorischen System für die Bewegungsplanung zur Verfügung. Sie können bei Bedarf wieder abgerufen, verändert oder erweitert werden. Diese Änderungen bedeuten für unser Gehirn allerdings einen Rechenaufwand (siehe Kapitel 1.3, Phasen des motorischen Lernens). Verfügt ein neues Auto z. B. über eine Servolenkung oder ein elektrisches Bremssystem, so ist es lebenswichtig, sich schnellstmöglich darauf einzustellen. Dafür ist es nötig, durch eine adaptive Veränderung der Transformationsregeln diese Diskrepanz zwischen dem Bekannten und dem Neuen zu überwinden, also die eigene Handlung wieder mit der erwarteten sensorischen Konsequenz in Übereinstimmung zu bringen. Sollen solche Adaptationsleistungen nun wissenschaftlich untersucht werden, muss das Lernen unter kontrollierten reproduzierbaren Bedingungen im Labor stattfinden. Dabei wird meistens auf erprobte Störungen zurückgegriffen, bei denen ein künstlich erschaffenes Missverhältnis zwischen der beabsichtigten Handlung und der daraus resultierenden Rückmeldung die Adaptation induziert. Der Proband lernt also, seine Transformationsregeln so zu verändern, dass er das gewünschte Ziel erreicht. Die adaptiven Prozesse, die dabei im zentralen Nervensystem ablaufen, halten so lange an, bis Handlung und Wahrnehmung nicht mehr im Widerspruch zueinander stehen (Bock 2001).

Bereits 1897 zeigte Stratton in einem Selbstversuch mit einer Prismenbrille, dass Menschen ihr Handeln auf Grund externer Störungen verändern und sich neuen Situationen anpassen können. Inzwischen ist bekannt, dass diese Adaptation nicht nur an

verschiedene visuelle Störungen (Kohler 1964; Bock 1992; Roby-Brami und Burnod 1995; Pine et al. 1996; Abeele und Bock 2001a; Seidler et al. 2001) sondern auch an mechanische Störungen (Lackner und DiZio 1994; Shadmehr und Mussa-Ivaldi 1994; Brashers-Krug et al. 1996; Gandolfo et al. 1996) möglich ist. Die visuelle Rückmeldung erfolgt in den meisten Studien über ein Fadenkreuz. Bei beiden Störungsarten, visuell und mechanisch, wird jeweils noch zwischen zwei Arten, positions- und nicht-positionsabhängig, unterschieden. Bei den visuellen Störungen gehören sowohl Prismenbrillen als auch Rotationen und Spiegelungen der visuellen Rückmeldung zu den positionsabhängigen Störungen (Kitazawa et al. 1997; Eversheim und Bock 2001). Dabei entspricht jeder Punkt auf der Soll-Bahn genau einem Punkt auf der abgelenkten Bahn, so dass eine Position der Hand genau zu einer Position des Fadenkreuzes gehört. Zu den nicht-positionsabhängigen Störungen gehören z. B. geschwindigkeitsabhängige Störungen. Dabei bewirkt die Geschwindigkeit der Hand eine proportionale Ablenkung des Fadenkreuzes (Bock und Thomas, in Vorbereitung). Bei den positionsabhängigen mechanischen Störungen entsteht die Ablenkung z. B. durch einen elastischen Stab, bei dem jeder Position genau eine Rückstellkraft zuzuordnen ist. Zu den nicht-positionsabhängigen mechanischen Störungen gehört z. B. die Corioliskraft, die bei Bewegungen in einem rotierenden System auftritt. Dabei bestimmt die Bewegungsgeschwindigkeit der Hand die ablenkende Kraft (Bourdin et al. 2001).

Wird eine Störung eingeführt, so nimmt die Genauigkeit der über die visuelle Rückmeldung gezeigten jeweiligen Bewegung zuerst stark ab und wird mit anhaltender Übung langsam wieder besser. Grafisch dargestellt werden die Ergebnisse solcher Tests in Kurven, wobei auf der Abszisse z. B. die Zeit oder einzelne Testabschnitte aufgetragen werden und auf der Ordinate die Maßeinheit der jeweils untersuchten Variable. Hierbei kann die Verbesserung entweder in Form einer ansteigenden Kurve (z. B. für Trefferzahlen) oder in einer abfallenden Kurve (z. B. für Reaktionszeiten oder Fehler) dargestellt werden. In den meisten Fällen handelt es sich um eine Exponentialfunktion. Während bei der Beschreibung solcher Kurven im englischen Sprachraum „performance“ und „learning“ voneinander abgegrenzt werden (Willingham et al. 1997), ist die Verwendung dieser Begrifflichkeiten im Deutschen häufig nicht eindeutig. Die Bezeichnung *Lernkurven* ist nicht zutreffend, da neben dem Gelernten sehr viele situative Merkmale, wie z. B. Müdigkeit oder Stress Einfluss auf den Kurvenver-

lauf haben und dieser somit nicht den reinen Lernerfolg darstellt. Die Bezeichnung *Leistungskurven* stellt fälschlicherweise einen Leistungsaspekt in den Vordergrund. Am ehesten scheint der Begriff *Adaptationskurven* angemessen, denn er beschreibt am besten, was die Kurven darstellen, nämlich die Adaptation an verschiedene Störungen. Daher werden solche Kurven in dieser Arbeit Adaptationskurven genannt.

### **1.2.1 Strategische Anpassung und Rekalibrierung**

Eine Adaptation an verschiedene Störungen, und somit eine Verbesserung der Bewegungsgenauigkeit, kann durch zwei verschiedene Prozesse entstehen (Redding und Wallace 1996; McNay und Willingham 1998). Einerseits gibt es eine strategische Anpassung durch kognitive Herangehensweisen an die Störung oder durch Korrekturen auf Grund visueller Rückmeldung. Andererseits wird die Rekalibrierung beschrieben, bei der es durch neuronale Vorgänge zu dauerhaften Veränderungen der Transformationsregeln kommt. Erstere sind abhängig von der visuellen Rückmeldung und sind aufgabenspezifisch, letztere bleiben auch ohne die visuelle Kontrolle erhalten und können in verschiedenen Kontexten angewandt werden. Es wird angenommen, dass die Adaptation beide Prozesse beinhaltet. Eine Unterscheidung zwischen der Adaptation durch strategische Anpassung und Rekalibrierung kann mit Hilfe von Untersuchungen der Nacheffekte erfolgen. Die Terminologie für diese Art von Untersuchungen ist in der Literatur nicht einheitlich. In dieser Arbeit ist der Begriff Nacheffekte der Oberbegriff, der alle genannten Tests umfasst, auch wenn in der Literatur einzelne Tests und Effekte als Nacheffekt beschrieben werden, wie z. B. die Deadaptation bei Shadmehr und Mussa-Ivaldi (1994).

Eine Möglichkeit, Nacheffekte zu kontrollieren, ist die *Persistenz*, auch Beständigkeit genannt. Sie wird mit oder ohne kurze Pause im Anschluss an eine Adaptationsphase getestet. Hierbei arbeiten die Probanden ohne visuelle Rückmeldung. Untersucht und dargestellt werden kann die Persistenz auf zwei verschiedene Weisen. Entweder wird der Unterschied zu der Grundbedingung gemessen, so dass das von der Adaptation Behaltene und Gespeicherte negativ aufgetragen wird, oder es wird weiterhin von der Störung ausgegangen, so dass das Behaltene positiv aufgetragen wird und mit dem vorherigen Fehler verglichen werden kann. Letztere Vorgehensweise wird in dieser Arbeit benutzt. Das Experiment von Bock (2005) ist ein gutes Beispiel dafür, dass die

Persistenz über den Anteil von Rekalibrierung und strategischer Anpassung an der Adaptation Aufschluss geben kann. Die Ergebnisse zeigten, dass die Adaptation der älteren Menschen sowohl langsamer als auch unvollständiger war als die der jungen Menschen. Da sich die Größe der Persistenz der beiden Gruppen jedoch nicht unterschied, und sich die besseren Ergebnisse der Jüngeren anschließend auch bei einer Folgeaufgabe zeigten, schloss Bock daraus, dass bei den Älteren nicht die Rekalibrierung sondern die strategische Kontrolle verringert ist.

Die *Retention*, auch Bewahrung genannt, ist eine weitere Möglichkeit zur genaueren Untersuchung der Adaptation. Sie wird in der Literatur als die Fähigkeit des Gedächtnisses beschrieben, Erlerntes zu behalten und bei Bedarf wieder abrufen zu können (Brashers-Krug et al. 1996; Bock 2001). In der Praxis ist dieses Phänomen sehr wichtig, da wir häufig auf früher gelernte Dinge zurückgreifen und erwarten, sie noch ausführen zu können, wie z. B. Radfahren oder Schwimmen. Auch in Laborstudien wird dieses Phänomen der Retention untersucht. Bock et al. (2001) beschrieben eine Studie, in der sie Folgebewegungen und visuelle Störungen benutzten. Sie fanden, dass das Gelernte Minuten später und sogar einen Monat später noch größtenteils vorhanden war. Wigmore et al. (2002) zeigten, dass die Adaptation, die in Folge einer visuellen 30°-Drehung stattfand, in einer zweiten Testung nach 24 Stunden einen geringeren Anfangsfehler aufwies als bei dem ersten Lernen der Störung. Die gelernten Zusammenhänge wurden also gespeichert und konnten am nächsten Tag wieder abgerufen werden. Für mechanische Störungen zeigten Shadmehr und Brashers-Krug (1997) die Retention. Sie arbeiteten mit Zeigebewegungen in einem Drehkraftfeld. In einer Adaptationsphase konnten alle Probanden ihre Bewegungen verbessern und zeigten ähnliche Bewegungen wie ohne das Kraftfeld. Da nach fünf Monaten das Gelernte immer noch abgerufen werden konnte, schlossen die Autoren daraus, dass sich in der ersten Sitzung ein internes Modell entwickelt hat, welches in der zweiten Sitzung abgerufen werden konnte. Diese Ergebnisse zeigen, dass neue Transformationsregeln lange im Gedächtnis verweilen und von dort immer wieder abgerufen werden können.

Nacheffekte des Gelernten können auch durch ein plötzliches Ausschalten der Störung überprüft werden. Bei dieser sogenannten *Deadaptation* bleibt die visuelle Rückmeldung erhalten. Wurde die Adaptation alleinig durch Strategien und visuelle

Kontrolle erreicht, dürfte es hierbei keinen oder nur einen sehr kleinen Fehler geben, da der Proband dann in der Lage sein sollte, Bewegungen ohne Störung genau auszuführen. Wurden die Bewegungen allerdings auf Grund einer Rekalibrierung geändert, so zeigt sich ein nachhaltiger Einfluss auf die Bewegungen ohne Störung, da der Proband nicht sofort umschalten kann und die Transformationsregeln für die „Normalbedingung“ erst wieder angepasst oder neu erstellt werden müssen. Nach einer Adaptation an eine visuelle oder eine mechanische Störung in die eine Richtung zeigt sich die Deadaptation durch Bewegungen in die andere Richtung (Lazar und van Laer 1968; Shadmehr und Mussa-Ivaldi 1994; Kitazawa et al. 1997).

Der *Transfer* ist eine weitere wichtige Untersuchung, durch die zwischen strategischer Anpassung und Rekalibrierung unterschieden werden kann. Da es sich dabei um eine Änderung der Adaptationsbedingungen, wie z. B. eine Verschiebung des Arbeitsraumes oder eine andere Störung handelt, wird der Transfer im nächsten Kapitel genauer erläutert.

### **1.2.2 Auswirkungen aufeinander folgender Adaptationsvorgänge**

Hinweise darauf, dass eine Rekalibrierung stattgefunden hat, können nicht nur mit dem bereits Gelernten, also derselben Störung, nach Minuten oder Monaten gewonnen werden. Wenn ein Mensch an eine Störung adaptiert hat und danach einer weiteren Störung, einer Abwandlung derselben Störung oder einer anderen Bewegungsaufgabe bei gleicher Störung ausgesetzt wird, kann sich das Gelernte auf verschiedene Arten auf das neu zu Lernende auswirken. Bei der Untersuchung dieses Phänomens ist der *Transfer* laut Magill (2001) eines der in Erziehung und Rehabilitation am häufigsten angewandten Lernprinzipien. Allerdings ist auch hier die Terminologie nicht eindeutig. Einige Autoren (Krakauer et al. 2000; Shadmehr und Moussavi 2000; Tong und Flanagan 2003) nennen dieses Phänomen Generalisierung. Untersuchungen von Transfer und Generalisierung sind nicht eindeutig voneinander zu trennen, daher werden sie in dieser Arbeit zusammengefasst. Nachdem die Probanden eine Störung erlernt haben, werden sie einer zweiten ausgesetzt, die sich in einem oder mehreren Aspekten von der ersten unterscheidet. Bei dieser zweiten Anpassung können verschiedene Parameter verändert werden: Benutzung der untrainierten Hand (Hamilton 1964; Bock 1992; Imamizu und Shimojo 1995; Sainburg und Wang

2002; Criscimagna-Hemminger et al. 2003), neue Bewegungsamplituden (Bock und Burghoff 1997; Goodbody und Wolpert 1998), andere Bewegungsrichtungen oder untrainierte Arbeitsbereiche (Krakauer et al. 2000; Shadmehr und Moussavi 2000; Malfait et al. 2002). Sogar für andere Bewegungsarten wurde der Transfer untersucht und gefunden: Abeele und Bock (2003) zeigten, dass sich die Adaptation an eine visuelle Drehung von Zeige- auf Folgebewegungen und umgekehrt übertrug. Die neuen Transformationsregeln stehen demnach verschiedenen motorischen Systemen zur Verfügung. Krakauer et al. (2000) untersuchten in ihrer Studie verschiedene Aspekte der Adaptation an visuelle Störungen. Im ersten Experiment arbeiteten sie mit einer Verhältnisänderung zwischen Finger- und Fadenkreuzbewegung. Änderte sich die Fingerposition um 1 cm, bewegte sich das Fadenkreuz auf dem Bildschirm um 1.5 cm. Dabei zeigten die Ergebnisse, dass diese Art der Adaptation sowohl über Richtungen als auch über Bewegungsdistanzen generalisiert. In dem zweiten und für diese Arbeit wichtigeren Teil der Studie untersuchten Krakauer et al. (2000) die Adaptation an eine visuelle Rotation und deren Generalisierung. Besonders interessant für diese Arbeit ist die Generalisierung über Richtungen. Die Autoren teilten ihre Probanden dafür in vier Gruppen ein, die an eine  $+30^\circ$ -Rotation unter Benutzung einer unterschiedlichen Anzahl von Zielpunkten (ein, zwei, vier oder acht) adaptierten. Die Generalisierung wurde auf vorher ungeübte Ziele ohne visuelle Rückmeldung getestet. Die Ergebnisse zeigten, dass die prozentuale Generalisierung stark abnahm, je weiter der Testzielpunkt von dem Trainingszielpunkt entfernt lag. Je mehr Ziele trainiert wurden, desto größer war die Generalisierung, komplett war sie bei acht Trainingszielen. Da in dem Ablauf der beschriebenen Studie allerdings nicht die Anzahl und die Verteilung der Trainingszielpunkte getrennt voneinander variiert wurde, bleibt offen, welches der entscheidende Faktor war. Auch bei mechanischen Störungen wurde der Transfer untersucht. Shadmehr und Moussavi (2000) benutzten in ihrer Studie ein positions- und geschwindigkeitsabhängiges Kraftfeld und zeigten eine Generalisierung des Gelernten in verschiedenen Experimenten. Die Ergebnisse solcher Transferuntersuchungen können Hinweise auf eine erfolgte Rekalibrierung geben, da die strategische Anpassung aufgabenspezifisch ist und nicht einfach übertragen werden kann (Redding und Wallace 1996).

Bei Transferuntersuchungen kann es entweder zu einer Erleichterung der neuen Adaptation (positiver Transfer), zu keinem Einfluss (neutraler Transfer oder Null-



Transfer) oder aber auch zu einer Erschwerung (negativer Transfer) der zweiten Adaptation kommen. Jeder kennt die Situation, nach einem Umzug die verinnerlichte Ziffernabfolge beim Wählen und die neue Telefonnummer durcheinander zu bringen, oder bei der Benutzung unterschiedlicher Autos Blinker und Scheibenwischer miteinander zu verwechseln. Treten in einer zweiten Adaptation höhere Fehlerwerte auf als bei naiven Kontrollprobanden, wird dieses Phänomen in der Literatur mit *Interferenz* bezeichnet (Krakauer et al. 1999; Bock 2003). Sie wurde bei verschiedenen aufeinanderfolgenden Störungen (visuell und / oder mechanisch) untersucht. Als eine Ursache einer Interferenz wird der Grad der Konsolidierung genannt. Darunter wird die Festigung der Adaptation im Gedächtnis verstanden, die auch nach Beendigung des Experiments noch stattfindet (McGaugh 1966). Zuerst ist die Adaptation sehr brüchig im Kurzzeitgedächtnis repräsentiert, bevor sie in einen stabileren Zustand im Langzeitgedächtnis übergeht (Shadmehr und Holcomb 1997). Shadmehr und Brashers-Krug (1997) ließen ihre Probanden an ein Krafftfeld (A) adaptieren. Nach unterschiedlichen Pausenlängen (fünf Minuten bis 24 Stunden) arbeiteten sie in einem entgegengesetzten Krafftfeld (-A). In einer zweiten Sitzung eine Woche später zeigte sich bei der erneuten Benutzung von Krafftfeld A eine Retention nur dann, wenn die Pausenlänge nach der ersten Sitzung größer war als ca. fünf Stunden, ansonsten kam es zu einer Interferenz. Ebenfalls mit einem solchen Retentionstest, allerdings bereits nach 24 Stunden, arbeiteten Brashers-Krug et al. (1996). Sie ließen ihre Probanden an ein geschwindigkeitsabhängiges Krafftfeld adaptieren und teilten sie dafür in sechs Gruppen ein. Die Kontrollgruppe benutzte in der zweiten Sitzung die gleiche Störung wie in der ersten und zeigte eine starke Retention, da der Anfangswert am zweiten Tag ungefähr dem Endwert des ersten Tages entsprach. Eine andere Gruppe führte direkt nach der ersten Adaptation Bewegungen ohne Störung aus. Bei ihr zeigte sich am zweiten Tag ebenfalls eine signifikante Retention und somit keine Interferenz. Vier weitere Gruppen adaptierten nach der ersten Sitzung an eine entgegengesetzte Störung, wobei zwischen den beiden Störungen unterschiedliche Pausen lagen (keine Pause bis vier Stunden). Bei den Gruppen ohne Pause, mit fünf Minuten und mit einer Stunde zeigte sich eine Interferenz, da der Anfangswert der zweiten Adaptation innerhalb der ersten Sitzung schlechter war als jener der ersten Adaptation. Dieses Phänomen wird auch als negativer Transfer oder anterograde Interferenz bezeichnet. Außerdem waren die Fehlerwerte der erneuten Adaptation an die erste Störung des

ersten Tages am nächsten Tag nicht signifikant besser als am Vortag, wie es in der Kontrollgruppe der Fall war. Dieses Ergebnis nannten die Autoren, ebenso wie Tong et al. (2002), retrograde Interferenz. In der Gruppe mit vier Stunden Pause zwischen der ersten und der zweiten Adaptation am ersten Tag ergab sich am zweiten Tag kein Unterschied zu der Kontrollgruppe. Die Autoren schlossen daraus, dass sich das Gelernte nach einer gewissen Zeit von einem zerbrechlichen zu einem stabilen Stadium konsolidiert und danach eine weitere Störung ohne Beeinträchtigung der ersten gelernt werden kann. Krakauer et al. (1999) untersuchten Zeigebewegungen mit Hilfe von zwei verschiedenen Störungen: eine visuelle Rotation (positionsabhängig) und eine mechanische Störung, die aus einer an der Armschiene lateral befestigten Masse von 1.5 kg bestand (beschleunigungsabhängig). Sie teilten ihre Probanden in sechs Gruppen ein, die alle an zwei aufeinander folgenden Tagen getestet wurden. Jede Gruppe führte am ersten und am zweiten Tag Zeigebewegungen mit entweder einer der beiden oder beiden Störungen in einer unterschiedlichen Kombination durch. Die Autoren fanden heraus, dass die alleinige Ausführung derselben Störung am ersten und zweiten Tag zu einer starken Retention und somit einer Verbesserung des Anfangsfehlers führte, sowohl für die visuelle als auch für die mechanische Störung. Wurden die Probanden am ersten Tag nach der Adaptationsphase einer zweiten Störung derselben Modalität ausgesetzt (nach einer  $+30^\circ$ -Rotation einer  $-30^\circ$ -Rotation, bzw. nach einer lateral angebrachten Masse einer medial angebrachten Masse), so war trotz Benutzung der ersten Störung des Vortages der Anfangsfehler am zweiten Tag gegenüber den Werten des ersten Tages nicht verbessert. Wurde am ersten Tag nach der Adaptation an eine visuelle  $+30^\circ$ -Drehung die Modalität geändert, also eine lateral befestigte Masse benutzt, so war sowohl die Adaptation an die mechanische Störung am ersten Tag als auch die Retention der Adaptation an die visuelle Störung am zweiten Tag nicht unterschiedlich von einzeln ausgeführten Adaptationen bei Kontrollprobanden. Ein ähnliches Bild zeigte sich, als beide Störungen gleichzeitig erlernt und auch am zweiten Tag wieder gleichzeitig ausgeführt wurden. Auch dabei ergaben sich keine Unterschiede zu der einzelnen Ausführung. Die Autoren schlossen aus diesen Ergebnissen, dass die Adaptation an diese beiden Störungen auf unterschiedlichen neuronalen Mechanismen beruht und verschiedene Kanäle dafür benutzt werden. Tong et al. (2002) stellten fest, dass die beiden von Krakauer et al. (1999) benutzten Störungen sich sowohl in ihrer Natur (visuell und me-

chanisch), als auch in ihrer Kinematik (positions- und beschleunigungsabhängig) unterschieden. Um herauszufinden, ob diese kinematische Variable einen Einfluss auf das Ergebnis hatte, testeten Tong et al. (2002) mit Zeigebewegungen die Adaptation an eine positionsabhängige visuelle Drehung, die nach einer fünfminütigen Pause gefolgt wurde von einer Adaptation an ein positionsabhängiges Drehkraftfeld. Nach 24 Stunden wurden die Probanden erneut der visuellen Rotation ausgesetzt. Die Autoren fanden eine im Vergleich zur Kontrollgruppe verringerte Retention und somit retrograde Interferenz. Aus ihren Ergebnissen schlossen Tong sie, dass die Kinematik der Störungen die Schlüsselvariable sei und zwei Störungen nicht miteinander interferieren, so lange sie auf unterschiedlichen kinematischen Parametern beruhen. In einem Experiment der Studie von Bock et al. (2001) trat Interferenz zwischen zwei visuellen Transformationen mit gleicher Kinematik (oben-unten und links-rechts Spiegelung) sogar noch nach einem Monat auf. Die Autoren schlossen aus diesem Teil ihrer Studie, dass die Konsolidierung nicht der entscheidende Aspekt in ihrer Studie war, sondern dass die Interferenz auf Grund des Konflikts zweier inkompatibler Aufgabenanforderungen auftrat. Da es sich um zwei positionsabhängige Störungen handelte, die zu Interferenz führten, widerspricht dieses Ergebnis nicht der Hypothese von Tong et al. (2002), dass keine Interferenz auftritt, wenn die Aufgaben unterschiedliche kinematische Variablen haben. In einer weiteren Untersuchung im Jahre 2003 hinterfragte Bock diese Hypothese. Er benutzte dafür drei visuelle Störungen, zwei positions- und eine geschwindigkeitsabhängige. Entgegen der Aussage von Tong et al. (2002) fand Bock (2003) eine Interferenz zwischen den positionsabhängigen und der geschwindigkeitsabhängigen Störung. Zur genaueren Untersuchung der auftretenden Interferenzen berechnete er an Hand der Abbildungen früherer Studien deren Werte der retrograden Interferenz. Er kam zu dem Schluss, dass die retrograde Interferenz um so größer ist, je ähnlicher sich die Natur (visuell oder mechanisch) und die kinematischen Variablen der Störungen sind. Er vertrat daher die Meinung, dass die sensomotorische Adaptation auf verteilten neuronalen Mechanismen beruht. Bock et al. (2003) wiesen darauf hin, dass der Ausdruck Interferenz irreführend sein kann, da es nicht unbedingt zu einer Interferenz zwischen zwei Störungen kommen muss. Die scheinbare gegenseitige Beeinflussung z. B. zweier Rotationen, so die Autoren, kann eine andere Ursache haben: Auf Grund einer vorherigen Adaptation an eine +30°-Drehung ist die Nullposition der angepassten Transformationsregeln des Pro-

banden auf ca.  $-30^\circ$  verschoben. Dadurch muss er, wenn er im Folgenden an eine  $-30^\circ$ -Drehung adaptieren soll, seine Bewegungen nicht nur von  $0^\circ$  bis  $+30^\circ$  sondern von  $-30^\circ$  bis  $+30^\circ$  anpassen, wodurch zu Beginn ein Fehler von ungefähr  $60^\circ$  entsteht.

Ein weiterer Mechanismus, durch den beim Erlernen einer zweiten Störung eine Erleichterung der Adaptation erklärt werden kann, ist das *Metallernen*, auch „learning-to-learn“ genannt. Dabei wird davon ausgegangen, dass generelle Strategien der Adaptation, erlernt werden und bei der zweiten unabhängigen Störung genutzt werden können. Dieses Phänomen wird von Bock et al. (2001) in ihrem dritten Experiment beschrieben, in dem die Probanden zunächst an eine oben-unten oder eine rechts-links Umkehr adaptieren mussten und in der zweiten Sitzung an eine  $180^\circ$ -Rotation. Jene, die bereits an die erste Störung adaptiert hatten, waren besser als naive Kontrollprobanden. Harlow sagte bereits 1949 aus, dass beim Lernen nicht einfach nur Wissen gespeichert wird, sondern, dass auch die Fähigkeit zu lernen verbessert wird. Es ist nicht leicht, dieses Phänomen des Metallernens zu zeigen, da eine Unabhängigkeit der Störungen nicht immer gegeben ist. Unabhängig heißt in diesem Fall, dass die Anforderungen der verschiedenen Aufgaben sich weder widersprechen noch übereinstimmen.

Bereits Gelerntes kann die folgende Adaptation aber nicht nur dadurch verbessern, dass das Lernen gelernt wird, sondern auch dadurch, dass bei der gleichen Störungsart von kleineren auf größere Störungen übergegangen wird oder umgekehrt. Hierbei ergibt sich eine stufenweise Anpassung, bei der das vorher Gelernte die folgende Adaptation direkt erleichtert. Im Gegensatz zum Metallernen, bei dem die aufeinanderfolgenden Störungen unabhängig voneinander sind, bauen sie hierbei somit aufeinander auf. Abeele und Bock (2001a) untersuchten dieses Phänomen mit visuellen Rotationen als Störung und bezeichneten es als *graduelle Verstellbarkeit*. Sie teilten ihre Probanden in drei Gruppen ein und ließen sie Folgebewegungen durchführen. In der ersten Sitzung wurde entweder keine Störung eingebracht, eine  $45^\circ$ -Rotation oder eine  $60^\circ$ -Rotation. In der zweiten Sitzung mussten alle Probanden an eine  $90^\circ$ -Rotation adaptieren. Die Ergebnisse zeigten, dass in der  $60^\circ$ -Gruppe des Vortages der Anfangsfehler in der zweiten Sitzung kleiner war als in der  $45^\circ$ -Gruppe und dort kleiner als in der Gruppe, die am ersten Tag die Bewegungen ohne Störung

ausgeführt hatte. Die Autoren schlossen daraus, dass die einmal gespeicherten Transformationsregeln nur noch „weitergedreht“ wurden, nicht aber wieder bei  $0^\circ$  angefangen werden musste. Zwei weitere Arbeiten (Abeele und Bock 2001b; Bock et al. 2003) haben gezeigt, dass dieser Mechanismus nicht für den gesamten Drehbereich von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  einheitlich ist. Die Autoren berichteten, dass eine graduelle Anpassung der Transformationsregeln nur in einem gewissen Bereich auftrat. Größer werdend ging dieser Bereich von  $0^\circ$  bis ca.  $120^\circ$ . Bei Störungen, die größer als  $90^\circ$  waren, schien zunächst ein Wechsel auf  $180^\circ$ , also eine Spiegelung an beiden Achsen, stattzufinden und danach eine graduelle Abnahme. Bei dieser trat die Erleichterung von  $180^\circ$  bis ca.  $70^\circ$  auf. Die alternative Erklärung von Bock et al. (2003) für die schlechteren Ergebnisse bei einer  $+30^\circ$ -Rotation nach einer  $-30^\circ$ -Rotation kann anstatt einer Interferenz ebenfalls mit diesem Phänomen erklärt werden, wodurch der größere Initialfehler auf eine graduelle Verschiebung durch den Nullpunkt zurückzuführen wäre. Lazar und van Laer (1968) teilten ihre Probanden in drei Gruppen ein und ließen sie in aufeinanderfolgenden Stufen an Prismengläser verschiedener Dioptriestärken adaptieren. Sie führten die Verbesserungen in den Stufen auf das learning-to-learn zurück. Allerdings handelte es sich eher um eine graduelle Anpassung, da die Störungen aufeinander aufbauten.

Eine Eigenschaft der sensomotorischen Adaptation, die durch die Kombination von Störungen erforscht wurde, ist die *modulare Struktur* (Bock 2001). Flanagan et al. (1999) zeigten in ihrer Studie mit einer positionsabhängigen visuellen Drehung und einer geschwindigkeitsabhängigen mechanischen Störung sowohl einen *Kompositions-* als auch einen teilweisen *Dekompositionsvorteil*. Ersterer besagt, dass nach vorherigem einzelnen Lernen der beiden Störungen das gemeinsame Lernen leichter war und einen geringeren Fehler aufwies als bei gleichzeitiger naiver Adaptation (Kompositionsvorteil), auch wenn die Übertragung des Gelernten nicht vollständig war. Letzterer bedeutet, dass auch nach gemeinsamer Adaptation an beide Störungen das Lernen der einzelnen Störung besser war als bei naiven Probanden (Dekompositionsvorteil). Demnach können im zentralen Nervensystem verschiedene erlernte Störungen nicht nur effektiv zusammengesetzt, sondern auch zerlegt werden. Die Autoren sahen dieses Ergebnis als Unterstützung der Hypothese einer modularen Struktur des internen Modells. Die Verbesserung durch die Dekomposition wurde allerdings nur bei der visuellen Transformation deutlich. Diesen fehlenden Dekomposi-

tions-Vorteil für die Kraftfeld-Bedingung erklärten sich Flanagan et al. (1999) mit einer Konzentrationsverlagerung hin zu der visuellen Drehung, da dort die größeren Fehler entstanden und somit eine schnellere Verbesserung möglich war.

### **1.3 Phasen des motorischen Lernens und die Doppelaufgaben-Methode**

Die Beschreibung von Adaptationskurven (Kapitel 1.2) vermittelt die Vorstellung, dass das Lernen eine kontinuierliche Verbesserung ist. Dieses entspricht zwar grob der Realität, doch bei genauerer Untersuchung von Lernvorgängen ist eine alternative Sicht sinnvoll. In der Vergangenheit schlugen Wissenschaftler verschiedene Modelle vor, die das Erlernen von Fertigkeiten in Stadien oder Phasen einteilten, von denen jede spezifische Anforderungen der Informationsverarbeitung erfüllt (Fitts 1964; Adams 1971; Schneider und Shiffrin 1977; Anderson 1982). Hierbei wurden von den verschiedenen Autoren unterschiedliche Anzahlen von Phasen beschrieben. Einige Modelle, wie z. B. das von Adams (1971), gingen von zwei Phasen aus, in die das motorische Lernen eingeteilt wird. Dabei schloss sich an eine verbal motorische Aneignungsphase eine motorische Verbesserungsphase an. Fitts (1964) unterschied drei Phasen, die inzwischen allgemein akzeptiert sind: Die erste Phase ist die *frühe Phase*. Hier versucht der Lernende, die Aufgabe kognitiv zu verstehen und mögliche Lösungen zu entwickeln. Diese Phase ist häufig gekennzeichnet von großen Anforderungen an die Aufmerksamkeit und verbalen (Selbst-)Anweisungen. Dies stimmt mit der Aussage überein, dass es zu Beginn eines Lernvorgangs unabhängig von der Art der gelernten Aufgabe zu einer erhöhten Nutzung der verbalen Ressourcen kommt. In dieser frühen Phase sind die Leistungsverbesserungen sehr groß. Die zweite Phase ist die *mittlere Phase*. Hier erfolgen feinmotorische Verbesserungen. Die Bewegung wird „runder“ und ökonomischer und die kognitiven Anteile werden geringer. Der Lernfortschritt in dieser Phase ist geringer als in der ersten. Die dritte und letzte Phase nennt Fitts (1964) *späte Phase*. Diese erreicht der Lernende durch weitere Übung und Automatisierung der Bewegung. Erst jetzt wird die benötigte Aufmerksamkeit so reduziert, dass das Bewusstsein frei ist, z. B. für Strategien und Taktiken. Darüber hinaus kann die Bewegung jetzt variabel in verschiedenen Situationen angewendet und angepasst werden. Der eigentliche sichtbare Lernerfolg in dieser Phase ist sehr

gering. Während des Lernens verändern sich die Prozesse somit von aufmerksamkeitsfordernden hin zu automatisierten. Auch Lintern und Wickens sagten 1991 in Übereinstimmung mit dem Beschriebenen aus, dass das sensomotorische System Phasen durchläuft, die durch unterschiedliche Ressourcenanforderungen gekennzeichnet sind. Sie berichteten, dass zu Beginn des Lernens der Ressourcenbedarf stark ansteigt und sich anschließend wieder reduziert. Die Einteilung des motorischen Lernens in verschiedene Phasen wird weiterhin durch Studien mit bildgebenden Verfahren unterstützt, die zeigen, dass sich die Gehirnaktivität insgesamt reduziert, je besser eine Fertigkeit beherrscht wird. Darüber hinaus wurde berichtet dass sich die Aktivität verschiedener Hirnareale von frühen zu späten Phasen des Lernens veränderte (Seitz et al. 1990). Allerdings sind die Ergebnisse von Studien zu diesem Thema nicht einheitlich und scheinen stark durch die Wahl der Kontrollaufgabe beeinflusst zu sein. Eine derzeitige Studie von Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Bewegungsphysiologie der Deutschen Sporthochschule Köln (mündliche Kommunikation) gibt Hinweise darauf, dass die bisher insgesamt erhöhte neuronale Aktivität auf einige Areale zu beschränken ist. Daher sollten weitere Studien mit einer geeigneten Kontrollaufgabe klären, ob auch die Aktivität der Hirnareale Anzeichen für die Einteilung des Lernprozesses in Phasen gibt. Denn obwohl die Phasen des Lernens allgemein akzeptiert sind, gibt es nur wenig empirische Beweise für ihre Existenz (Heuer 1984; Eversheim und Bock 2001). Da sich die maßgeblichen Prozesse des motorischen Lernens einer direkten Beobachtung entziehen (Kropp 1992), ist es nötig, Experimente zu entwickeln, um Informationen über die ablaufenden Prozesse zu erhalten. Dafür wurde das Lernen in verschiedenen Wissenschaften auf unterschiedliche Arten untersucht und ist in der experimentellen Psychologie ebenso von Interesse wie in der Sportwissenschaft. Ein Ansatz, mit dem die Prozesse des motorischen Lernens intraindividuell genauer untersucht wurden, ist die Doppelaufgaben-Methode, die in den folgenden Absätzen beschrieben wird.

### **Studien mit der Doppelaufgaben-Methode**

Führt jemand zwei Dinge gleichzeitig aus, so wird das als Doppelaufgabe bezeichnet. Dabei handelt es sich in der Mehrheit der Fälle um eine motorische und eine kognitive Aufgabe. Für die meisten von uns ist es natürlich, sich bei einem Spaziergang zu unterhalten oder mit dem Telefon durch die Wohnung zu laufen. Jeder Mensch führt

also häufig Doppelaufgaben aus, ohne es wirklich zu merken. Explizit gefordert werden solche Aufgaben in wissenschaftlichen Experimenten: die kognitiven Anforderungen während der Adaptation an verschiedene Störungen können mit Hilfe des Doppelaufgaben-Ansatzes untersucht werden (Navon und Gopher 1979). Dabei wird die Adaptationsaufgabe, auch Lernaufgabe genannt, mit einer gleichzeitigen Zweitaufgabe kombiniert. Dieser Ansatz basiert auf der Sicht, dass beide Aufgaben um die Ressourcen des Gehirns konkurrieren. Wenn nun der Ressourcenbedarf der Adaptationsaufgabe zunimmt, so wird der Wettkampf schärfer und die Leistung einer der beiden oder sogar beider Aufgaben wird schlechter als in der getrennten Aufgabenerfüllung. Somit wird der Ressourcenbedarf deutlich als sogenannte Doppelaufgabeninterferenz. Dieses beruht auf der Annahme, dass Ressourcen nicht nur limitiert, sondern auch gemeinsam nutzbar sind (Norman und Bobrow 1975).

Es wurden verschiedene Theorien aufgestellt, die anschließend entweder erweitert oder verworfen wurden, doch es wurde kein allgemeingültiges Modell bestimmt und herausgearbeitet: Verschiedene Untersuchungen führten zu der Ein-Kanal- oder auch Filter-Theorie (Broadbent 1958), die besagt, dass für die Reizverarbeitung nur ein Kanal zur Verfügung steht und die ankommende Information gefiltert wird. Das würde bedeuten, dass ein zweiter Reiz erst dann verarbeitet werden kann, wenn der erste Reiz bereits den Kanal verlassen hat. Diese Theorie wurde jedoch z. B. von (Kahneman (1973) wieder verworfen, der postulierte, dass für die Reizverarbeitung ein limitierter Pool unspezifischer Ressourcen zur Verfügung steht. Demnach ist eine parallele Reizverarbeitung nur dann ohne Interferenzeffekte möglich, solange die Addition der benötigten Ressourcen innerhalb des vorhandenen limitierten Pools bleibt. Auch Shiffrin und Schneider (1977) gingen von unspezifischen Ressourcen aus. Ihrer Meinung nach werden unabhängig von der Art des Reizes die gleichen Ressourcen zur Verarbeitung genutzt. Sie beschrieben eine Zwei-Prozess-Theorie, nach der nur kontrollierte, nicht-automatisierte Prozesse ressourcenabhängig und aufmerksamkeitsfordernd sind und automatisierte Prozesse davon ausgeschlossen werden. Auch diese beiden Ansätze wurden kritisiert, da verschiedene Studien Interferenzen ergaben, die nicht damit erklärt werden konnten. Aus diesen Überlegungen heraus entwickelte sich die Theorie multipler Ressourcen (Wickens 1984), nach der voneinander unabhängige Ressourcen für die Verarbeitung von Informationen in unterschiedlichen Phasen zuständig sind. Manzey (1993) zweifelte daran, dass ein hoher Ressourcen-



bedarf verantwortlich ist für die Interferenz zweier Aufgaben. Er sah die Ursache eher darin, dass die Probanden die Aufgaben nicht voneinander entkoppeln konnten, so dass die Arbeitsstrategien untersucht werden sollten.

Doppelaufgaben können aber nicht nur, wie oben genannt, aus einer motorischen und einer kognitiven Aufgabe bestehen, sondern auch aus zwei Aufgaben derselben Art. Daraus ergeben sich zwei Ursachen für Interferenzeffekte: die Aufgaben können um die gleiche Modalität sowohl bei der Aufnahme als auch bei der Ausgabe von Informationen konkurrieren. Bei ersterer kann es sich z. B. um zwei visuelle oder zwei auditive Reize an verschiedenen Stellen handeln, die somit nicht gleichzeitig, sondern nur nacheinander aufgenommen werden können. Bei der Ausgangsseite können Interferenzen auftreten, wenn z. B. beide Hände Bewegungen in unterschiedlichen Rhythmen machen sollen. Es ist zwar möglich, verschiedene Rhythmen zu erlernen, doch macht der Mensch weniger Fehler bei simultanen (in-phasigen) Bewegungen und tendiert auch zu diesen (Kelso 1984). Gleiche oder ähnliche periphere Ein- und Ausgangssysteme sind somit eine mögliche Erklärung für Interferenzen, allerdings nicht die einzige. Um diese Problematik genauer zu untersuchen wurden verschiedene Studien mit sehr unterschiedlichen Abläufen durchgeführt.

Es wird deutlich, dass die Doppelaufgaben-Methode bereits in vielen frühen Studien verwendet wurde, doch auch neuere Experimente befassten sich damit. In entsprechenden Studien wurden verschiedene Lernaufgaben benutzt, wie z. B. eine kontinuierliche Folgeaufgabe (McLeod 1973) und wiederholte Fingerbewegungssequenzen (Noble et al. 1967; Wolff und Cohen 1980; Nissen und Bullemer 1987; Hazeltine et al. 1997; Ruthruff et al. 2005). Diese Aufgaben wurden mit verschiedenen Zweitaufgaben kombiniert, wie z. B. verbalen Antworten auf nebenbei präsentierte Töne (Ruthruff et al. 2005), dem wiederholten Aufsagen von Reimen (Wolff und Cohen 1980) oder dem Kopfrechnen (McLeod 1973). In allen Studien lernten die Probanden die jeweiligen Aufgaben und wurden mit zunehmendem Training besser, auch wenn sich bei den meisten Studien ein schlechteres Ergebnis unter Doppelaufgaben-Bedingungen zeigte. In einigen Experimenten war die Geschwindigkeit, mit der sich die Probanden verbesserten dennoch dieselbe wie in einer Kontrollgruppe (Noble et al. 1967), in anderen nicht (Hazeltine 1997). Daraus kann geschlossen werden, dass eine Zweitaufgabe die momentane Leistung beeinflusst, nicht aber in allen Fäl-

len das Lernen der Aufgabe. Insgesamt gesehen haben die bisher beschriebenen Doppelaufgaben-Studien verschiedene Nachteile: Zum einen wurde immer nur eine Art von Zweitaufgabe pro Studie benutzt. Da es sich in den unterschiedlichen Studien um verschiedene Arten von Zweitaufgaben handelte, könnten diese zu spezifischen Interferenzeffekten geführt haben, so dass ein Vergleich schwer ist. Zum anderen wurden die Zweitaufgaben in vielen Studien durchgehend angeboten, so dass es keine intraindividuellen Vergleiche von Doppel- zu Einzelaufgaben gibt. In zwei sehr frühen Doppelaufgaben-Studien (Mohnkopf 1933; Bahrick und Shelly 1958) wurde die Zweitaufgabe nicht nur kontinuierlich mit der Lernaufgabe gegeben, sondern in Intervallen, so dass intraindividuelle Vergleiche der Doppel- und Einzelaufgabenleistung möglich waren. Bei Mohnkopf (1933) wurde allerdings nur eine Zweitaufgabe benutzt, so dass kein qualitativer Unterschied des Ressourcenanspruchs gemacht werden konnte. Bahrick und Shelly (1958) benutzten zwar ebenfalls nur eine Zweitaufgabe, doch variierte ihre Erstaufgabe. Die Autoren interpretierten ihre Ergebnisse derart, dass sich eine zunehmende Automatisierung bei Aufgaben, die gleichzeitig ausgeführt werden, als hilfreich erweist. Logie (1989) führten drei Experimente mit einem komplexen Computerspiel als Lernaufgabe und verschiedenen Zweitaufgaben durch. Untersucht wurden die Einflüsse der Zweitaufgaben bei geübter Ausführung des Computerspiels und bei ungeübter Ausführung. Sowohl bei Fortgeschrittenen als auch bei Anfängern zeigte sich eine gegenseitige Beeinflussung der Aufgaben, je nach Art der Zweitaufgabe zu Ungunsten des Computerspiels oder der Zweitaufgabe. Bei Anfängern zeigten sich unterschiedliche Auswirkungen mit zunehmendem Trainingsgrad des Spiels. Dieses Ergebnis war ein Hinweis auf einen sich ändernden Ressourcenbedarf im Verlauf des Lernens. Da das Computerspiel jedoch eine komplexe Aufgabe war, konnte keine eindeutige Aussage darüber gemacht werden, welche Ressourcen genau zu welchem Zeitpunkt benötigt wurden. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Studien haben Eversheim und Bock (2001) in ihrem Experiment versucht, die Bedingungen so zu schaffen, dass die beschriebenen Nachteile nicht auftraten. Als Lernaufgabe benutzten sie manuelle Folgebewegungen, als Zweitaufgabe untersuchten sie verschiedene Reaktionszeitaufgaben, die unterschiedliche kognitive und motorische Ressourcen ansprachen. Sowohl für die Lernaufgabe alleine als auch für alle Doppelaufgabenbedingungen wurde eine Grundbedingung ohne Störung erhoben, so dass ein Vergleich möglich war. Nach dieser Grundbedin-

gung führten Eversheim und Bock (2001) eine oben-unten Transformation der visuellen Rückmeldung bei der Folgeaufgabe ein. Sie zeigten, dass die Ressourcenanforderungen zu Beginn der Adaptation anstiegen und die einzelnen Anforderungen zu verschiedenen Zeitpunkten im Adaptationsverlauf unterschiedlich hoch waren. So waren zuerst die Ressourcen der Aufmerksamkeit und der räumlichen Transformation besonders beansprucht. Während die Ressourcen der räumlichen Transformation länger gefordert waren, schlossen sich an die erhöhte Aufmerksamkeit Ressourcen der Bewegungsvorbereitung an. Die Autoren interpretierten ihre Ergebnisse als experimentellen Hinweis darauf, dass motorisches Lernen in Phasen mit unterschiedlichen Ressourcen-Anforderungen abläuft. Am Ende der Adaptationsphase befand sich der auf Grund der Zweitaufgaben erhöhte Fehler für alle Reaktionsaufgaben in einem Bereich oberhalb der Grundbedingung. Dieses könnte entweder auf eine gemeinsame zentrale Ressource zurückzuführen sein, die von allen Doppelaufgaben gleichermaßen gebraucht wurde, oder auf periphere Einschränkungen auf Grund zweier manueller Aufgaben. In weiteren Studien fand Eversheim (2002) heraus, dass dieses Beanspruchungsmuster für verschiedene Transformationen der visuellen Rückmeldung gilt. Dieses sah er als einen Hinweis für die allgemeine Gültigkeit des gefundenen Musters der Ressourcenbeanspruchung. Er gab damit empirische Hinweise auf die angenommene qualitative und quantitative Veränderung des Ressourcenbedarfs während des Lernens. Der Autor konnte allerdings auf Grund zu geringer Effekte nicht eindeutig klären, ob die bestehende Doppeltätigkeitsinterferenz am Ende der Adaptationsphase durch zentral-kognitive oder peripher-motorische Mechanismen entstand.

#### **1.4 Rolle der Propriozeption bei der sensomotorischen Adaptation**

Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, spielt die Rückmeldung bei der sensomotorischen Adaptation eine wichtige Rolle. In diesem Kapitel soll nun näher auf die propriozeptive Rückmeldung eingegangen werden.

### **1.4.1 Die Propriozeption**

Die Propriozeption (lat. proprius „eigen“, recipere „aufnehmen“) ist die Wahrnehmung der Stellung und der Bewegung des Körpers im Raum. Spezifische Rezeptoren, die Propriozeptoren, registrieren Informationen über die Muskelspannung (Golgi-Sehnenorgan), die Muskellänge (Muskelspindel) und die Gelenkstellung bzw. -bewegung. Teilweise werden diese Informationen auf Rückenmarksebene verschaltet (propriozeptive Reflexe), vor allem aber werden sie unter Einbeziehung der Afferenzen von Vestibularapparat und Mechanorezeptoren der Haut zentral verarbeitet. Ursprünglich umfasste die Propriozeption nicht die Bewegung (Kinästhetik) und war strenger definiert, doch im Laufe der Jahre verschwamm dieser Unterschied im angloamerikanischen Sprachraum und wird inzwischen auch in der deutschen Sprache häufig nicht mehr gemacht.

### **1.4.2 Einfluss der Propriozeption auf die sensomotorische Adaptation**

Die Rezeptoren in Muskeln, Gelenken und der Haut sind für die Ausführung zielgerichteter Bewegungen von Bedeutung (Polit und Bizzi 1979; Ghez et al. 1990; Sainburg et al. 1995). Die Rolle dieser Propriozeptoren bei der sensomotorischen Adaptation ist allerdings noch nicht geklärt. Um sie zu erforschen wurden bereits verschiedene Ansätze benutzt, doch diese Studien erbrachten sehr unterschiedliche Ergebnisse.

Bereits 1966 führten Kravitz und Wallach Untersuchungen zu der Rolle der Propriozeption bei der Adaptation mit Hilfe von Vibration durch. Sie vibrierten den stationären Arm ihrer Probanden und ließen sie anschließend eine Zeigebewegung unter Prismenverschiebung durchführen. Die Ergebnisse zeigten, dass die vorherige Vibration zu mehr Adaptation führte. Eine weitere Studie, in der Vibration und Prismen miteinander verbunden wurden, wurde 1975 von Mather und Lackner durchgeführt. Ihre Probanden führten identische Zeigebewegungen in zwei Phasen durch. Dazwischen wurde der Arm durch Vibration des Biceps und des Triceps auf und ab bewegt und dabei durch Prismengläser verfolgt. Die Autoren interpretierten ihre Ergebnisse derart, dass auf Grund der durch Vibration verstärkten Propriozeption eine größere Adaptation erreicht werden konnte als durch willkürliche Bewegungen. Bock et al. (2005b) et al. arbeiteten in einer sehr neuen Studie mit bilateraler Vibration, die in

ihren Augen die Propriozeption störte. Sie fanden, dass die isometrische Kraftproduktion bei den Probanden mit gestörter Propriozeption geringer war als bei Kontrollprobanden. Allerdings handelte es sich bei dieser Studie nicht um die Erforschung von Adaptation.

Einen anderen Ansatz als die Vibration wählten Wallace und Garrett (1973). Sie schalteten bei ihren Probanden die propriozeptive Rückmeldung des Armes durch Hypnose aus, um den Einfluss der Propriozeption auf die Adaptation zu erforschen. Die Probanden mussten den Arm bewegen und ihn dabei durch Prismengläser beobachten. Da die Autoren in Nacheffekt-Tests keinen Hinweis auf Adaptation fanden, schlossen sie daraus, dass die Propriozeption im Arm erhalten sein muss um adaptieren zu können. Dieser Aussage widersprachen die Ergebnisse von Spanos und Saad (1984). Sie anästhesierten den Arm ihrer Probanden mit Hypnose, ließen sie mit Zeigebewegungen an Prismen adaptieren und fanden Nacheffekte. Da nicht vollständig bekannt ist, wie und auf welchen Ebenen des sensomotorischen oder kognitiven Systems sich Hypnose in diesen Experimenten auswirkte, sind diese unterschiedlichen Ergebnisse fragwürdig und wahrscheinlich nicht übertragbar auf nicht hypnotisierte gesunde Menschen.

Eine dritte Methode zur Erforschung der Rolle der Propriozeption bei der Adaptation ist die Untersuchung von deafferentierten Menschen und Affen, deren Ergebnisse jeweils mit denen von Kontrollprobanden verglichen wurden. 1974 untersuchten Taub und Goldberg deafferentierte Affen und Kontrolltiere. Sie lehrten sie, zu visuell dargebotenen Zielpunkten zu zeigen. Während sie die Zielpunkte durch eine Prismenbrille sahen, mussten sie ihre Zeigebewegungen mit dem nicht sichtbaren Arm anpassen. Da der Nacheffekt bei deafferentierten Tieren vollständiger war als bei Kontrolltieren, schlossen die Autoren daraus, dass intakte Propriozeption die Adaptation in ihrer Studie störte. Eine frühe Studie mit einem deafferentierten Patienten und Kontrollprobanden führten Lajoie et al. im Jahre 1992 durch und sie kamen zu einem ähnlichen Ergebnis. Die Probanden sahen das Bild eines sechszackigen Sternes durch einen Spiegel und mussten das Muster so schnell und genau wie möglich nachzeichnen. Die Kontrollprobanden waren zu Beginn des Experiments signifikant langsamer als am Ende, während bei dem Patienten keine Verlangsamung eintrat. Die Autoren gingen daher davon aus, dass die Ursache dafür in einem Konflikt zwischen visueller

und propriozeptiver Information liegt. Mit zunehmender Übung lernten die Kontrollprobanden, die umgekehrte visuelle Information zu nutzen. Da der Patient diesen sensorischen Konflikt nicht hatte, war die Aufgabe für ihn von Beginn an eine einfache visuelle Folgeaufgabe. Bard et al. (1995) führten eine Studie mit verschiedenen Teilaspekten durch. Insgesamt nahmen daran zwei deafferentierte Patienten und mehrere Kontrollprobanden teil. Im ersten Teil wurde die isometrische Krafterzeugung zwischen Daumen und Zeigefinger untersucht. Die Probanden mussten auf ein verbales Kommando randomisiert zwischen 10% und 70% ihrer Maximalkraft erzeugen. Die Ergebnisse zeigten, dass der an diesem Experiment teilnehmende deafferentierte Proband, im Gegensatz zu den Ergebnissen der Vibrationsstudie von Bock et al. (2005b), mit der gleichen Genauigkeit arbeitete wie die Kontrollprobanden. Daraus schlossen die Autoren, dass der Patient über ein exaktes internes Kraftmodell verfügte. Im zweiten Teil der Studie von Bard et al. (1995) wurde die Rolle der Propriozeption bei der Adaptation an Prismengläser untersucht. Die Kontrollprobanden und die beiden Patienten führten Zeigebewegungen zu zwei Zielen, 20° links und 20° rechts der Mittellinie durch und mussten sich an optische Verschiebungen anpassen. In diesem Experiment adaptierte einer der Patienten und die Kontrollprobanden relativ gut, während der andere Patient keine Adaptation zeigte. Die Autoren nahmen an, dass dieser Unterschied auftrat, da die Läsionshöhe der Patienten verschieden war: Bei dem ersten Patienten war die Nackenpropriozeption intakt, so dass er auf die Referenzsysteme von Auge zu Kopf und Hand zu Kopf zurückgreifen konnte. Da der Körper der zweiten Patientin ab der Nase betroffen war, konnte sie nicht auf räumliche Informationen zurückgreifen. Eine weitere Studie mit dem Probanden, bei dem die Nackenpropriozeption intakt war, führten Ingram et al. (2000) durch. Die sechs Kontrollprobanden und der deafferentierte Patient führten Armbewegungen zu visuell dargestellten Zielpunkten durch, wobei das Verhältnis von Arm- zu Fadenkreuzbewegungen auf verschiedene Weise verändert wurde. Die Ergebnisse zeigten eine reduzierte Bewegungsgenauigkeit ohne Propriozeption. Sie ergaben aber ebenfalls, dass nicht nur die Kontrollprobanden, sondern auch der Patient an die visuelle Störung adaptieren konnten, wenn er auch nur in einigen Bedingungen das Niveau der Kontrollprobanden erreichte. 1998 testeten Guedon et al. einen deafferentierten Patienten und mehrere Kontrollprobanden in einer manuellen Kreis-Folgeaufgabe. Nach der Registrierung von Grundbedingungsdaten mit und ohne visuelle Rückmeldung wurde

die Beziehung von der Hand- zur Fadenkreuzbewegung geändert. Eine Bewegung der Hand von 1 cm resultierte nun in eine Fadenkreuzbewegung von 2.5 cm, entweder in vertikaler, in horizontaler oder in beide Richtungen. Die Probanden führten sowohl Versuche mit als auch ohne visuelle Rückmeldung durch. Während die Kontrollprobanden angemessen adaptierten, zeigte der Patient in diesem Experiment, im Gegensatz zu vorherigen Ergebnissen, deutlich weniger Adaptation als die Kontrollprobanden. Die Autoren schlossen daraus, dass Armpropriozeption zu plastischen Veränderungen beiträgt, die auf eine solche Veränderung der Bewegungsbeziehung folgen. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Patienten also entweder besser adaptierten als die Kontrollprobanden (Taub und Goldberg 1974; Lajoie et al. 1992), gleich gut (Bard et al. 1995; Ingram et al. 2000), oder sie adaptierten weniger oder gar nicht (Bard et al. 1995; Guedon et al. 1998; Ingram et al. 2000). Diese unterschiedlichen, teilweise entgegengesetzten Ergebnisse können darauf zurückzuführen sein, dass die Patienten mit der Zeit kinematische (Sainburg et al. 1995; Ingram et al. 2000) und kognitive (Cole und Sedgwick 1992; Ingram et al. 2000) Strategien entwickelt haben, um trotz ihrer Defizite das tägliche Leben meistern zu können (Bard et al. 1995; Cole 1995). Es ist also davon auszugehen, dass sich die Patienten in vielen Situationen nicht so verhalten wie die Kontrollprobanden, und dass ihnen ihre Kompensationsstrategien in einigen Versuchsbedingungen helfen, in anderen nicht. Außerdem gibt es nur sehr wenige deafferentierte Patienten auf der Welt und diese haben schon an sehr vielen verschiedenen Studien teilgenommen. Da Bock et al. (2001) herausgefunden haben, dass bereits Gelerntes sich auch nach langer Zeit noch gegenseitig beeinflussen kann, ist es möglich, dass die Daten von erleichternden oder erschwerenden Überlappungen verfälscht sind. Es kann also gesagt werden, dass die Ergebnisse aus Studien mit deafferentierten Patienten nur wenige Erkenntnisse über die Rolle der Propriozeption bei der sensomotorischen Adaptation gesunder Menschen liefern können, so dass dafür andere Experimente benötigt werden.

## 1.5 Intention dieser Arbeit

Die Intention dieser Arbeit liegt darin, die bisherigen Erkenntnisse über die sensomotorische Adaptation zu erweitern, indem die Einflussgrößen Kognition und Propriozeption näher untersucht werden.

Hierfür werden zunächst in zwei Vorexperimenten einige für das Design der anschließenden Experimente wichtige Grundfragen geklärt. Im ersten Vorexperiment werden die Ergebnisse von Krakauer et al. (2000) in der Hinsicht genauer hinterfragt, ob die Anzahl oder die Verteilung der Zeigeeile oder ob sogar beide Faktoren entscheidend sind für das Ausmaß des Transfers auf ungeübte Bewegungsrichtungen und somit für die Generalisierung der Adaptation. Das Ergebnis wird darüber Aufschluss geben, welche Faktoren bei den Experimenten mit Zeigebewegungen zu berücksichtigen sind. Des weiteren sollte in dieser Arbeit erstmals in der Arbeitsgruppe Bewegungsphysiologie der Deutschen Sporthochschule Köln eine mechanische Störung bei Adaptationsexperimenten eingesetzt werden. Aus diesem Grund wird in einem zweiten Vorexperiment untersucht, ob sich durch den Einsatz eines elastischen Stabes als mechanische Störung geeignete Adaptationskurven ergeben, um so auf die Anschaffung eines teuren Roboteraufbaus verzichten zu können.

Anschließend an diese beiden Vorexperimente folgen zwei Experimente zur Kognition. Eversheim und Bock (2001) haben gezeigt, dass sich der Ressourcenbedarf während des motorischen Lernens qualitativ und quantitativ verändert. Diese Aussage konnte Eversheim (2002) auf verschiedene Veränderungen der visuellen Rückmeldung erweitern. Wenn ein sich ändernder Ressourcenbedarf dem sensomotorischen System als grundlegend zugeschrieben werden kann, so müsste er auch für eine Vielzahl von Variationen der Lernaufgabe gelten. Daher soll die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Eversheim und Bock auf eine andere Bewegungskategorie untersucht werden. Abeele und Bock (2003) fanden nicht nur heraus, dass adaptive Veränderungen auf verschiedene Bewegungskategorien übertragbar sind, sondern auch, dass der Transfer der Adaptation von Zeige- zu Folgebewegungen größer war als umgekehrt. Nach der Ergänzung durch ein Folgeexperiment kamen die Autoren zu dem Schluss, dass bei Folgebewegungen Verbesserungen nicht nur durch Rekalibrierung entstehen, sondern auch durch Kontrolle der visuellen Rückmeldung der



Bewegungen. Da diese Möglichkeit bei ballistischen Zeigebewegungen nicht gegeben ist, soll für die Lernaufgabe, bei der Eversheim und Bock (2001) Folgebewegungen benutzten, hier auf Zeigebewegungen gewechselt werden. In einer Pilotstudie erwies es sich jedoch als sehr schwer, zwei diskrete Bewegungen in verschiedene Richtungen gleichzeitig auszuführen, nämlich Zeigebewegungen und die von Eversheim und Bock (2001) benutzten manuellen Reaktionszeitaufgaben. Deshalb werden in dem ersten Experiment dieser Arbeit zur Kognition zunächst verbale Reaktionszeitaufgaben, die den bekannten manuellen möglichst ähnlich sein sollen, erprobt. Dafür werden die bekannten Folgebewegungen mit vier Reaktionszeitaufgaben gekoppelt, zwei manuellen und zwei verbalen. Im zweiten Experiment wird der eigentlichen Fragestellung nachgegangen und die gleichzeitige Ausführung von Zeigebewegungen und fünf unterschiedlichen Reaktionszeitaufgaben untersucht, vier verbalen und einer manuellen. Wenn sich ähnliche Ergebnisse wie bei Eversheim und Bock (2001) sowie Eversheim (2002) zeigen, kann bestätigt werden, dass das beschriebene Muster des Ressourcenbedarfs auch auf verschiedene Bewegungskategorien übertragbar ist.

Die abschließenden Experimente dieser Arbeit untersuchen die Rolle der Propriozeption bei der sensomotorischen Adaptation. In der Einleitung wurde deutlich, dass mehrere Versuche unternommen wurden, um die Rolle der Propriozeption bei der sensomotorischen Adaptation zu erforschen. Bei den bisher durchgeführten Versuchen traten allerdings Probleme der Vergleichbarkeit auf, da die Vibration nicht während willkürlicher Adaptationsbewegungen benutzt wurde, die Auswirkungen der Hypnose nicht vollständig bekannt sind und bei den Patienten Läsionshöhe und Vorerfahrungen nicht einheitlich waren. In den Experimenten dieser Arbeit zur Propriozeption werden die in den bisherigen Studien aufgetretenen Probleme vermieden indem nur die Propriozeption von Hand und Fingern bei gesunden Probanden gestört wird. Dafür wird ein relativ neuer Ansatz (vgl. Bock et al. 2005b) benutzt: Es wird Vibration verwendet, doch im Gegensatz zu Kravitz und Wallach (1966) sowie Mather und Lackner (1975) wird mit gleichzeitiger beidseitiger Vibration des sich willkürlich bewegenden Armes gearbeitet. Um sowohl die Wirksamkeit des benutzten Vibrationsaufbaus zu untersuchen und zu bestätigen als auch die entstehenden Ergebnisse besser interpretieren zu können, wird den beiden Adaptationsexperimenten mit Vibration ein Kontrollexperiment vorangestellt. Im vorletzten Experiment dieser Arbeit wird die Adaptation an eine visuelle und im letzten an eine mechanische Störung unter-

sucht. In beiden Experimenten wird mit Zeigebewegungen gearbeitet und dabei jeweils bei der Hälfte der Probanden die Vibration während der Bewegungsausführung eingeschaltet. Wenn sich in diesen Experimenten ein Einfluss der Propriozeption auf die sensomotorische Adaptation ergibt, können diese Ergebnisse sowohl für zukünftige Versuche als auch für die Bauweise von Steuerknüppeln in der Luft- und Raumfahrt sowie in der Rehabilitation von Bedeutung sein.

Aus dem bisherigen Wissensstand ergeben sich also zwei Hauptfragestellungen, die mit dieser Arbeit beantwortet werden sollen:

1. Verändert sich die Rolle der Kognition bei der Benutzung verschiedener Bewegungskategorien, oder lässt sich das bei Eversheim und Bock (2001) gefundene Muster des Ressourcenbedarfs von Folge- auf Zeigebewegungen übertragen?
2. Welche Rolle spielt die Propriozeption bei der Adaptation an visuelle und mechanische Störungen?

## 2 Experimente

In diesem Kapitel wird zunächst die experimentübergreifende Methodik erläutert. Anschließend werden die sieben durchgeführten Experimente gruppiert nach Vorexperimenten, Experimenten zur Kognition und Experimenten zur Propriozeption beschrieben. Dabei werden jeweils die spezielle Methodik erläutert und die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

### 2.1 Experimentübergreifende Methodik

Die Experimente dieser Arbeit waren mit Ausnahme von Experiment E (Tab. 1), dessen Methodik in Kapitel 2.4.1 erläutert wird, Adaptationsexperimente und sie waren vom Aufbau her sehr ähnlich. Um Wiederholungen in den folgenden Kapiteln zu vermeiden, wird in diesem Kapitel die experimentübergreifende Methodik der Experimente A-D, F und G beschrieben. Die spezielle Methodik in den Kapiteln zu den einzelnen Experimenten weist somit nur noch auf die jeweiligen Besonderheiten hin. In den durchgeführten Experimenten ging es um die Erforschung der sensomotorischen Adaptation. Dafür wurden die Probanden Situationen ausgesetzt, auf die sie mit einer Änderung des normalen Bewegungsablaufes reagieren mussten. Bei den geforderten Bewegungen handelte es sich um Folgebewegungen (FB) oder Zeigebewegungen (ZB), teilweise zusätzlich um Reaktionsaufgaben (RA).

#### 2.1.1 Versuchspersonen

An den Experimenten A-E und G (Tab. 1) nahmen Studenten und Mitarbeiter der Deutschen Sporthochschule Köln teil. Bei den Probanden des Experiments F handelte es sich um Studenten und Angestellte der Université de la Méditerranée in Marseille. Abgesehen von korrigierten Sehschwächen zeigte keiner der Probanden sensomotorische Defizite. Es wurde darauf geachtet, dass keiner der Probanden an mehreren der durchgeführten Adaptationsexperimente teilnahm oder bereits früher an einer ähnlichen Studie teilgenommen hatte, um eine Auswirkung auf die Ergebnisse, wie sie noch nach Monaten auftreten kann (Bock et al. 2001), zu vermeiden. Die Experimente wurden von der Ethikkommission der Deutschen Sporthochschule Köln

genehmigt. Alle Versuchspersonen wurden vor Beginn des jeweiligen Experiments über dessen Ablauf aufgeklärt und sie unterzeichneten eine entsprechende Einverständniserklärung. Die Probanden verteilten sich wie folgt auf die einzelnen Experimente:

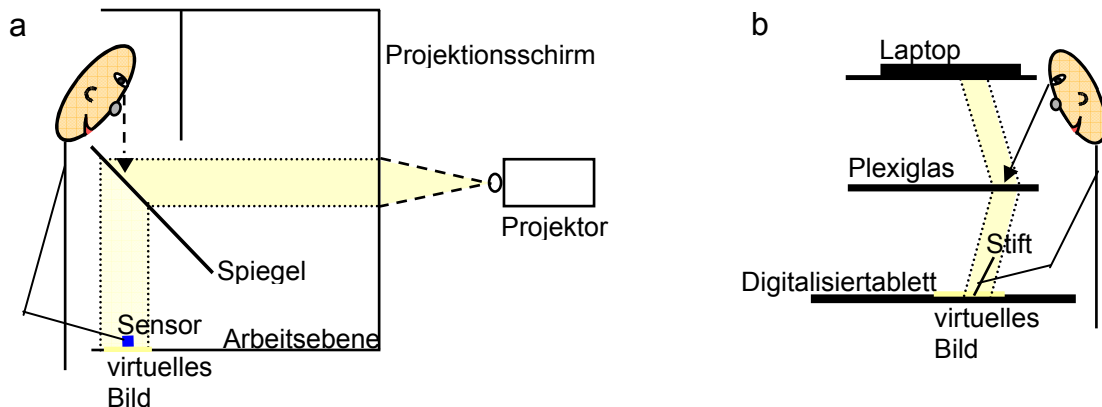
	<b>Experiment</b>	<b>Σ</b>	<b>w</b>	<b>m</b>	<b>Alter</b>	<b>Aufgabe(n)</b>
A	Einfluss der Zielpunktverteilung bei Zeigebewegungen	24	12	12	22-27	ZB
B	Erprobung einer mechanischen Störung	24	11	13	19-30	ZB
C	Ressourcenbedarf bei einer Doppeltätigkeit mit Folgeaufgabe	8	3	5	18-25	FB und RA
D	Ressourcenbedarf bei einer Doppeltätigkeit mit Zeigeaufgabe	10	6	4	20-27	ZB und RA
E	Auswirkung von Vibration auf die propriozeptive Rückmeldung	8	3	5	24-35	ZB
F	Auswirkung von Vibration auf die Adaptation an eine visuelle Störung	20	4	16	20-41	ZB
G	Auswirkung von Vibration auf die Adaptation an eine mechanische Störung	20	6	14	21-34	ZB

**Tab. 1 : Überblick über die Probanden der einzelnen Experimente**

### 2.1.2 Versuchsaufbau

Der Aufbau aller Adaptationsexperimente beruhte auf dem gleichen Prinzip: Um eine optimale Körperhaltung gewährleisten zu können, saßen die Probanden auf einem höhenverstellbaren Hocker. Ihnen wurde ein Computerdisplay als virtuelles Bild auf einer horizontalen Fläche präsentiert. Dafür gab es zwei Varianten: Bei der einen (Experimente A-D, siehe Abb. 1a) wurde das Display von dem Projektor auf einen Rückprojektionsschirm und von dort auf einen um 45° gekippten Spiegel weitergeleitet. Dadurch entstand das virtuelle Bild des Displays auf der horizontalen Arbeitsfläche vor dem Probanden. Bei der zweiten Möglichkeit (Experimente F und G, siehe Abb. 1b) wurde das Computerdisplay direkt horizontal auf einer getönten Plexiglas-

scheibe, unter der ein schwarzes Tonpapier angebracht war, abgebildet und erschien als virtuelles Bild auf der Arbeitsfläche des Probanden. Bei allen Versuchen war die Sicht auf die arbeitende Hand durch den Aufbau verdeckt, jedoch wurde die Position des dominanten Zeigefingers bzw. der Stiftspitze erfasst und den Probanden als Fadenkreuz innerhalb des virtuellen Bildes visualisiert. Dadurch waren Transformationen der visuellen Rückmeldung (RM) gegenüber der Handbewegung möglich.



**Abb. 1: Schematische Darstellung der beiden Varianten des Versuchsaufbaus**

Ein Computerbild wurde entweder von einem Projektor über einen Projektionsschirm oder direkt von einem Laptop dargestellt. Die Probanden sahen dieses Bild virtuell über einen Spiegel oder eine Plexiglasscheibe, so dass es für sie auf der horizontalen Arbeitsebene erschien. Sie arbeiteten entweder mit ihrem dominanten Zeigefinger, auf dem ein Sensor befestigt war, oder mit einem Stift in der dominanten Hand.

### 2.1.3 Versuchsablauf

In allen Adaptationsexperimenten wurde vor Beginn der Bewegungsbereich kalibriert, um die richtigen Werte aufzuzeichnen. Die Experimente waren in Episoden unterteilt. Diese dauerten je nach Experiment zwischen 16 und 35 Sekunden. Zwischen diesen Episoden waren Pausen von 5-10 Sekunden, in denen der Proband jeweils seinen Folge- oder Zeigefehler der vorherigen Episode zur Motivation auf dem Monitor angezeigt bekam. Da die Pausenlänge Einfluss sowohl auf den Endwert der Adaptation als auch auf deren Zeitverlauf hat (Bock et al. 2005a), ist es sinnvoll, bei solchen Experimenten auf die Pausenlänge zu achten. Bei Pausen zwischen 5 und 10 Sekunden zeigte sich laut Bock et al. (2005a) kein signifikanter Unterschied.

Generell kann der Ablauf der Adaptationsexperimente in zwei Gruppen eingeteilt werden: Die Experimente C und D sind sogenannte Doppelaufgaben-Experimente (DA-Experimente), in denen der Proband parallel zu der Folge- oder Zeigeaufgabe

zusätzlich Reaktionsaufgaben ausführen musste. Die Experimente A, B, F und G sind sogenannte Einzelaufgaben-Experimente (EA-Experimente), in denen der Proband ZB ausführen musste. Da es kleine Unterschiede in der Ausführung gibt, werden in den nächsten Abschnitten nur die gemeinsamen Grundelemente der Experimente beschrieben. Der genaue Ablauf wird in dem jeweiligen Kapitel separat erläutert.

#### *Einzelaufgaben-Experimente (Experimente A, B, F, G)*

Gemeinsam ist allen EA-Experimenten, dass die Probanden sich zuerst in einer Gewöhnungsphase mit den Bewegungen vertraut machten, bevor die auswertungsrelevante Aufzeichnung begann. Danach erfolgte in der sogenannten Grundbedingung eine Erfassung der motorischen Leistung ohne Störung in je drei Episoden ohne und mit visueller RM. Anschließend wurde eine Störung eingeschaltet, um motorisches Lernen zu induzieren (Adaptationsphase). Nach 30 Episoden dieser Phase folgte eine kurze Phase der Persistenz von drei Episoden ohne visuelle RM. Wie in der Einleitung beschrieben, verdeutlichen die Ergebnisse dieser Phase das Behaltene und lassen Rückschlüsse zu, zu welchem Teil es sich bei der Verbesserung um Rekalibrierung des motorischen Systems bzw. um strategische Anpassung handelt. Bei zwei Experimenten wurde eine fünfminütige Pause vor der Persistenzphase gemacht, damit sich das Gelernte im Gedächtnis konsolidieren, also festigen, konnte. Bei Experiment F musste aus Programmgründen darauf verzichtet werden, und wegen der gewünschten Vergleichbarkeit wurde auch in Experiment G auf die Pause verzichtet. Nach einigen Auffrischungsepisoden mit visueller RM, die nicht ausgewertet wurden, folgte je nach Versuch eine 22-27 stündige Pause oder es wurde direkt fortgesetzt mit einer anderen Störung. Da sich die Experimente in dieser Fortsetzung unterschieden, wird darauf in der jeweiligen speziellen Methodik eingegangen.

#### *Doppelaufgaben-Experimente (C und D)*

Die DA-Experimente bestanden jeweils aus einer Lernaufgabe (LA) und einer Zweitaufgabe (ZA). Die Probanden lernten die unterschiedlichen RA, aus denen die ZA bestand, zuerst einzeln kennen. Im ersten Experiment waren es vier verschiedene und im zweiten Experiment fünf verschiedene RA. Anschließend erhielten die Probanden für eine Episode die LA einzeln, entweder FB oder ZB, bevor sie die gleichzeitige Ausführung beider Aufgaben übten, FB und RA oder ZB und RA. Um Ermüdungen auf Grund einer zu langen Testdauer vorzubeugen, wurden die Übungsauf-

gaben an einem ersten Untersuchungstag durchgeführt. Diese Daten wurden nicht ausgewertet. Die Übungszeit war ausreichend, um für den eigentlichen Test am zweiten Tag Verbesserungen auf Grund von Gewöhnung ausschließen zu können. 22-26 Stunden später erfolgte die eigentliche Testung, deren Daten ausgewertet wurden. Ein Abschnitt der Experimente, in dem jede ZA genau einmal vorkam, wurde Block genannt. Innerhalb eines solchen Blocks wurde die Reihenfolge der ZA über die Probanden nach der Methode des lateinischen Quadrates ausbalanciert, so dass jede Art der RA gleich häufig zu jedem Zeitpunkt des Experiments vorkam. So konnte Trainings- oder Ermüdungseffekten vorgebeugt werden, da zu jedem Zeitpunkt des Experiments jede ZA gleich häufig vorkam. Auftretende Effekte konnten somit nur der Art der jeweiligen RA zugeschrieben werden. Der zweite Tag begann mit einer DA-Episode zur Vorbereitung, die für alle Probanden die gleiche RA benutzte. Diese Episode wurde nicht ausgewertet. Danach erfolgte die Erfassung der motorischen Leistung ohne Störung nicht nur unter EA-Bedingungen sondern auch als DA für jede Art der RA (Grundbedingung). Anschließend wurde als Störung das Verhältnis von Fadenkreuz und Fingerbewegung geändert um motorisches Lernen zu induzieren (Adaptationsphase). Auch in diesem Abschnitt wurden sowohl EA als auch DA durchgeführt.

### *Folgeaufgabe*

Folgeaufgaben sind bereits in vielen Studien verwendet worden, um die Adaptationsfähigkeit von Probanden zu untersuchen (McLeod 1973; Bock et al. 2001; Abeeel und Bock 2003). In dieser Arbeit bewegte sich bei der Folgeaufgabe ein Zielpunkt mit einem Durchmesser von 1 cm mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf einer nicht vorhersagbaren Bahn auf dem Bildschirm. Die Folgebewegungen wurden mit dem Zeigefinger der dominanten Hand ausgeführt. Die Probanden sollten mit dem dargestellten Fadenkreuz dem Zielpunkt möglichst genau folgen und dabei die Arbeitsebene durchgehend leicht berühren. Basierend auf elektromagnetischer Induktion wurden die Bewegungen von einem Fastrack® Motion Analysis System mit einer Genauigkeit von 1 mm und einer zeitlichen Auflösung von 120 Hz aufgezeichnet.

### *Zeigeaufgabe*

Auch Zeigebewegungen wurden bereits in vielen Studien benutzt um die Adaptationsfähigkeit von Probanden zu untersuchen (Taub et al. 1975; Rao und Gordon

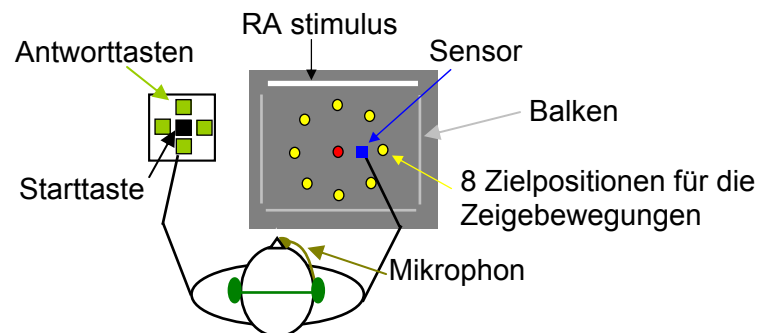
2001; Abeele und Bock 2003; Bock et al. 2005a). In dieser Arbeit befanden sich acht mögliche punktförmige Zielpositionen auf einer Kreisbahn um einen Mittelpunkt, der als zentraler Startpunkt diente. Alle Punkte hatten einen Durchmesser von 1 cm. Die Probanden hatten die Aufgabe, von dem Mittelpunkt so schnell wie möglich zu dem jeweils ausbalanciert erleuchteten Zielpunkt und zurück zum Mittelpunkt zu zeigen, um von dort aus auf den nächsten erscheinenden Punkt zu reagieren. Die Zielpunkte waren dabei für 500 ms erleuchtet, unabhängig davon, ob der Proband sie erreichte oder nicht. Der Startpunkt dagegen blieb so lange sichtbar, bis der Proband in einem Bereich von 0.5 cm um den Mittelpunkt herum für 300 ms verweilt hat. Diese Verweildauer wurde eingeführt, damit sichergestellt war, dass der Proband jede neue Bewegung aus dem Startbereich heraus begann. Die Zeigebewegungen wurden entweder mit dem Zeigefinger der dominanten Hand (Abb. 1a) oder einem Stift in der dominanten Hand (Abb. 1b) ausgeführt, wobei die Arbeitsebene auf dem Tisch oder Digitalisiertablett immer leicht berührt werden musste. Es sollten geradlinige, ballistische, genaue Bewegungen ohne Korrekturen ausgeführt werden. Die Fingerposition der Probanden wurde erneut mit Hilfe eines Sensors (Abb. 1a) von einem Fastrak® Motion Analysis System mit einer Auflösung von 1 mm und einer zeitlichen Auflösung von 120 Hz aufgezeichnet. Die Position der Stiftspitze wurde entweder von dem Digitalisiertablett mit einer Auflösung von 0.38 mm und einer Aufzeichnungsrate von 60 Hz oder von einem Roboterarm (PHANTOM™ Premium 1.5A, SensAble Technologies, Inc.®) mit einer Auflösung von 0.3 mm und einer Aufzeichnungsrate von 60 Hz aufgezeichnet.

### *Zweitaufrage*

Die ZA der Probanden bestand aus verschiedenen RA (vgl. Eversheim und Bock 2001). Vor jeder Episode erhielten die Probanden auf dem Bildschirm eine Information über die kommende Anforderung. Zur Verdeutlichung wird an dieser Stelle nur die Kontrollaufgabe beschrieben: Auf dem Bildschirm erschienen vier schmale graue Linien (0.1 cm x 36 cm), die parallel zu dessen Seiten angeordnet waren (Abb. 2). Nach einer zufälligen Zeitspanne von 700-1300 ms wurde eine dieser Linien in ausbalancierter Reihenfolge für 100 ms zu einem weißen Balken (1 cm x 36 cm) verbreitert. Diese Verbreiterung simulierte ein Aufleuchten des Balkens und galt für die Probanden als Stimulus. Den Stimuluspositionen (oben, unten, rechts, links) entsprechend



gab es um eine zentrale Starttaste herum vier Antworttasten, die ebenfalls oben, unten, rechts und links angeordnet waren. Der Proband durfte bei den RA nur den Zeigefinger der nicht dominanten Hand benutzen und musste die mittlere Starttaste gedrückt halten. Als Reaktion auf den Stimulus war ein Tastendruck auf die entsprechende Antworttaste erforderlich, der so schnell wie möglich erfolgen sollte, und gefolgt wurde von der direkten Rückkehr zu der Starttaste. Leuchtete z. B. der obere Balken auf, so musste die obere Antworttaste gedrückt werden. Hierbei waren also Ressourcen der Antwortwahl beansprucht. Die jeweils benutzten Aufgaben werden in der speziellen Methodik der einzelnen Experimente beschrieben. Bei verbalen ZA sprachen die Probanden die Antwort auf den Stimulus in das Mikrophon des Kopfhörers, den sie während des gesamten Experiments trugen (Abb. 2).



**Abb. 2: Aufbau des DA-Experiments mit Zeigebewegungen**

#### 2.1.4 Auswertung

Abgesehen von den Übungs- und Gewöhnungsepisoden wurden alle Episoden eines Probanden zunächst mit Programmen ausgewertet, die Mitarbeiter des Instituts für Physiologie und Anatomie geschrieben haben. Anschließend wurden die Programme Excel (Microsoft®Excel 2000, 9.0.3821 SR-1), Prism (GraphPad PRISM®, Version 2.01) und Statistica (STATISTICA® 6.0 für Windows, StatSoft, Tulsa) für die weitere Auswertung und die grafische Darstellung benutzt.

#### *Folgaufgabe*

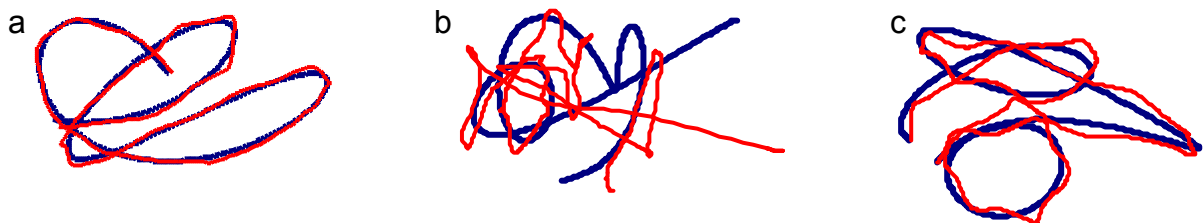
Entscheidend für die Genauigkeit der Folgeleistung des Probanden war der mittlere Abstand des Fadenkreuzes zum Mittelpunkt des Zielpunktes. Quantifiziert wurde der Folgefehler als sogenannter RMS-Fehler (Root-Mean-Square-Fehler; siehe Gl. 1).

$$\text{RMS-Fehler [mm]} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n}}$$

**Gl. 1: Gleichung für die Berechnung des RMS-Fehlers**

$\Delta x_i$  und  $\Delta y_i$  sind die horizontalen und vertikalen Abstände zwischen dem Zielpunkt und dem Fadenkreuz im  $i$ 'ten Datensatz,  $n$  ist die Anzahl der registrierten Messzeitpunkte.

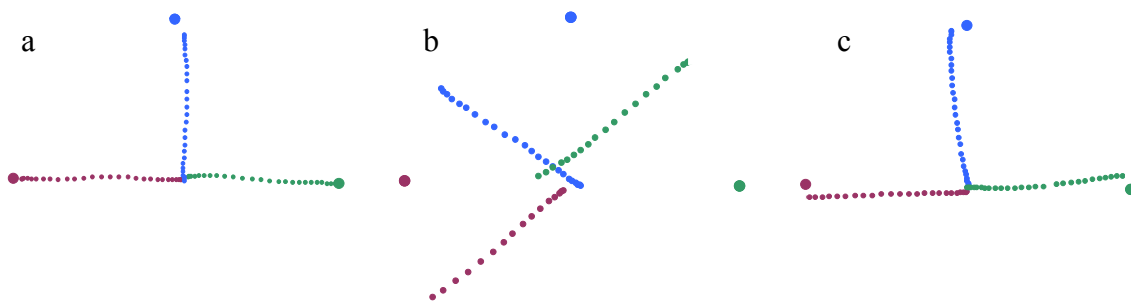
Hierbei wurden in jeder Episode die ersten 500 ms nicht ausgewertet, um Artefakte auf Grund der anfänglichen Handposition zu vermeiden. Wurde der Abstand zum Zielpunkt, also der RMS-Fehler, mit zunehmender Übungszeit kleiner, so konnte daraus geschlossen werden, dass die Bewegung genauer ausgeführt wurde, und dass bei den Probanden ein Lernprozess stattgefunden hat. Abb. 3 zeigt typische Bewegungen des Zielpunktes und des Fadenkreuzes eines Probanden in der Grundbedingung (a), direkt nach Einführung der oben-unten Vertauschung der RM (b) und am Ende der Adaptationsphase (c). Für jede Episode ergab sich ein RMS-Fehlerwert, der die gemittelte Folgegenauigkeit während einer Episode darstellte. Diese Fehlerwerte wurden für alle Episoden eines jeden Probanden mit Excel grafisch dargestellt, so dass sich für jeden Probanden eine individuelle Adaptationskurve ergab.



**Abb. 3: Rohdaten von Bewegungen des Zielpunkts (blau) und des Fadenkreuzes (rot)** (a) zeigt typische Folgebewegungen in der Grundbedingung, (b) zu Beginn der oben-unten Transformation und (c) nach vielen Episoden mit der Transformation.

*Zeigeaufgabe*

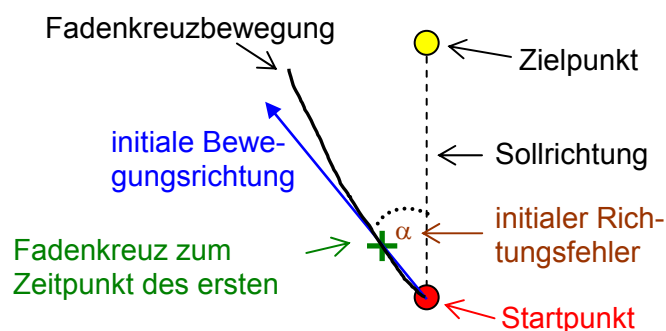
In Abb. 4 sind typische Fadenkreuzbewegungen eines Probanden in der Grundbedingung (a), direkt nach Einführung einer  $+60^\circ$ -Rotation (b) und am Ende der Adaptationsphase (c) dargestellt. Die Transformation der jeweiligen Zeigeexperimente wird in der speziellen Methodik der einzelnen Kapitel erläutert.



**Abb. 4: Rohdaten von Bewegungen des Fadenkreuzes bei Zeigebewegungen**

Typische Zeigebewegungen in der Grundbedingung (a), zu Beginn einer  $+60^\circ$ -Rotation der visuellen RM (b) und am Ende der Adaptationsphase. Aus Gründen der Übersicht sind nur Bewegungen zu drei der acht Ziele dargestellt.

Bei den Zeigebewegungen wurde jede einzelne Bewegung betrachtet und mit einer Software ausgewertet, die im Institut für Physiologie und Anatomie programmiert wurde. Die erste Zeigebewegung jeder Episode wurde dabei weggelassen, um Artefakte auf Grund eines falschen Startpunkts zu vermeiden. Die automatische Startpunktbestimmung des benutzten Programms, bei der ein Überschreiten der Bewegungsgeschwindigkeit von 32 mm/s als Schwelle für den Bewegungsbeginn genommen wurde, musste in weniger als 1% der Fälle manuell korrigiert werden. Das Ende der Hinbewegung, welches als Endpunkt der Bewegung mit derselben Schwelle von 32 mm/s definiert wurde, musste dagegen in ungefähr 10% der Fälle manuell korrigiert werden. Die in allen Experimenten untersuchte Variable war der initiale Richtungsfehler ( $\alpha$ ), der sich aus der Abweichung der initialen Bewegungsrichtung der Hand von der Sollrichtung ergab. Die initiale Bewegungsrichtung der Hand wurde dabei durch die Gerade von dem Startpunkt der Bewegung zu dem Punkt des ersten Geschwindigkeitsmaximums bestimmt (Abb. 5).



**Abb. 5: Darstellung der Berechnung des Fehlerwinkels bei Zeigebewegungen**

Gezeigt ist eine typische Zeigebewegung eines Probanden bei einer  $+60^\circ$ -Rotation der visuellen RM,  $v_{\max}$  bedeutet Geschwindigkeitsmaximum.

Der Zeitpunkt, zu dem die Abweichung von der Sollrichtung bestimmt wird, kann großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Da die Probanden RM an Hand der Fadenkreuzbewegung bekamen, konnte es trotz der Anweisung *nicht* zu korrigieren, zu Korrekturen kommen. Diese treten nach frühestens 190 ms auf (Keele und Posner 1968), sollen allerdings bei der Winkelberechnung nicht mit einbezogen werden, da nicht die Verbesserung durch die visuelle RM gemessen werden soll. Daher war es wichtig, einen Zeitpunkt zu bestimmen, zu dem diese Korrekturen noch nicht stattgefunden hatten. Je nach Experiment und Episodenlänge ergaben sich pro Episode zwischen 15 und 25 einzelne Fehlerwerte. Um den Einfluss von Ausreißer-Bewegungen möglichst gering zu halten, wurde aus diesen Einzelwerten über jeweils eine Episode der Median gebildet. Diese Mediane wurden für alle Episoden eines jeden Probanden grafisch dargestellt, so dass sich für jeden Probanden eine individuelle Adaptationskurve ergab. Wurden in einem Experiment weitere Variablen untersucht, so werden diese in der speziellen Methodik des jeweiligen Experiments beschrieben.

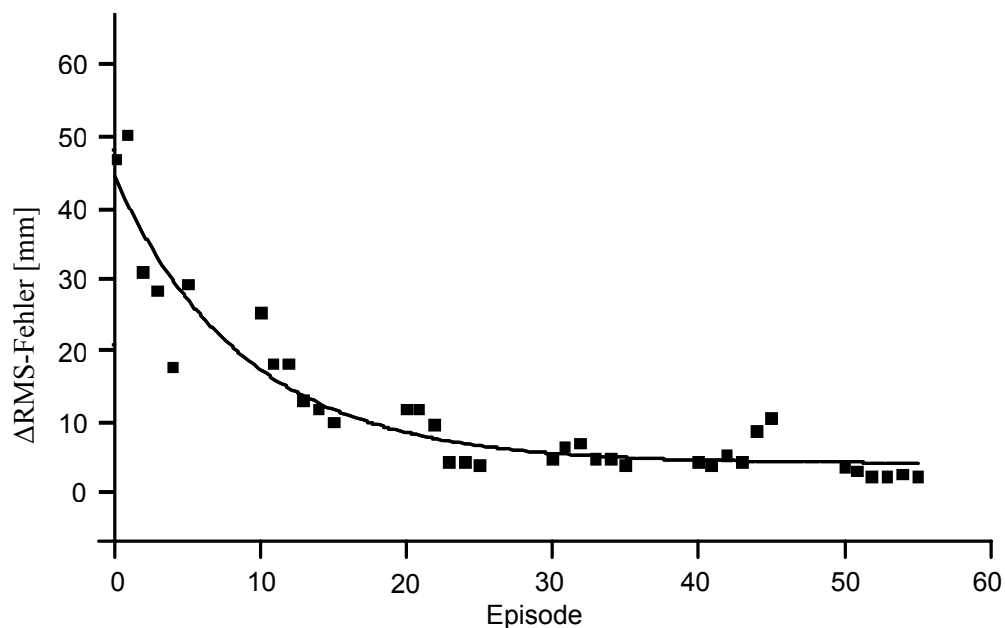
### *Zweitaufrage*

Alle Reaktionszeiten wurden entweder durch einen Tastendruck auf der Antwortbox oder mit Hilfe des Mikrophons eines Kopfhörers aufgezeichnet. Um bei der Auswertung der RA sowohl eine Antizipation des Stimulus als auch ein Vergessen der Reaktion auszuschließen, wurden nicht nur Reaktionen in die falsche Richtung sondern auch zu schnelle ( $<100$  ms) oder zu langsame ( $>1500$  ms) Reaktionen herausgefiltert und somit nicht berücksichtigt. Die gültigen Reaktionszeiten wurden für alle Episoden eines jeden Probanden dargestellt, so dass sich auch für diese Variable für jeden Probanden eine individuelle Adaptationskurve ergab.

### *Doppelaufgaben-Experimente*

In den DA-Experimenten lag zu jedem Zeitpunkt entweder ein LA-Fehlerwert einer EA oder einer DA vor. Um die Auswirkungen der DA berechnen zu können, war es nötig, einen geschätzten EA-Wert zu dem Zeitpunkt einer DA zu ermitteln. Dafür wurde mit dem Programm Prism eine Funktion mit bestmöglicher Anpassung für die EA-Daten gesucht. Bei dieser Anpassungsfunktion handelte es sich für die beiden DA-Experimente dieser Arbeit um einen einphasigen exponentiellen Abfall. Ein Beispiel einer solchen Anpassungskurve für einen Probanden zeigt die Abb. 6. Mit Hilfe dieser Funktion wurde, wie bei Eversheim und Bock (2001) beschrieben, der vorher-

gesagte Fehlerwert einer EA zum Zeitpunkt einer DA berechnet und die Differenz als  $\Delta$ RMS-Fehler oder  $\Delta$ Zeigefehler bestimmt.



**Abb. 6: Beispiel einer Anpassungsfunktion**

Bei der Anpassungsfunktion durch die EA-Fehlerwerte eines Probanden aus Experiment C handelt es sich um eine Exponentialfunktion.

Da die Probanden in jedem ZA-Block jede Art der RA genau einmal durchgeführt haben, konnte unabhängig von den unterschiedlichen Reihenfolgen der RA ihr spezifischer Einfluss auf die Folgeleistung innerhalb eines Blocks bestimmt werden. Auf diese Weise ergab sich für jede ZA eine eigene  $\Delta$ RMS-Kurve.

**Statistische Auswertung**

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm Statistica. Hiermit wurden Varianzanalysen (ANOVA) mit Messwiederholungen durchgeführt. Werte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit unter 0.05 wurden als signifikant gewertet. Zur genaueren Unterscheidung wurden die F-Werte gekennzeichnet mit n.s. für  $p > 0.05$ , mit \* für  $p < 0.05$ , mit \*\* für  $p < 0.01$  und mit \*\*\* für  $p < 0.001$ .

Damit die Ergebnisse einer ANOVA mit Messwiederholungen mit mehr als zwei Stufen als gültig angesehen werden können, müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein: die verbundene Symmetrie und die Sphärizität. Die Voraussetzung der verbundenen Symmetrie ist erfüllt, wenn die Varianzen und Kovarianzen für die Messwiederholun-

gen homogen sind. Diese, allerdings nur hinreichende, Bedingung wurde mit dem Levene's Test untersucht. Es ergaben sich für die Experimente dieser Arbeit keine Signifikanzen. Die Voraussetzung der Sphärizität verlangt, dass die Komponenten innerhalb der Probanden unabhängig voneinander sind. Für die Überprüfung dieser notwendigen und hinreichenden Bedingung wurde der Mauchly's Sphärizität Test benutzt. Ergaben sich Signifikanzen, so wurden die Freiheitsgrade und Irrtumswahrscheinlichkeiten nach Huynh / Feldt (1970) korrigiert und in der korrigierten Form angegeben.

Signifikante Effekte für die einzelnen Faktoren und deren Interaktion wurden anschließend mit dem Fisher LSD Post hoc-Test genauer untersucht. In den verschiedenen Experimenten ergaben sich sehr viele Signifikanzen. Deshalb können nicht alle Ergebnisse der Post hoc-Tests grafisch dargestellt werden, dafür werden die Zahlenwerte im Text angegeben. In dem ersten Vorexperiment wird exemplarisch das Ergebnis des Post hoc-Tests einer signifikanten Interaktion grafisch dargestellt.

## 2.2 Vorexperimente

In den beiden folgenden Experimenten wurden wichtige Grundfragen für das Design der anschließenden Experimente geklärt.

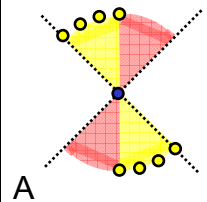
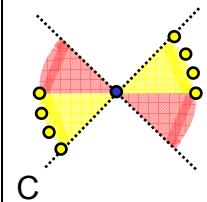
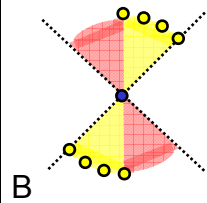
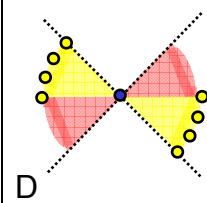
### 2.2.1 Einfluss der Zielpunktverteilung bei Zeigebewegungen

Da in mehreren Experimenten dieser Arbeit mit Zeigebewegungen gearbeitet wurde, war es sinnvoll, sich zunächst Gedanken über die Verteilung der Zielpunkte bei Zeigebewegungen zu machen. Krakauer et al. (2000) untersuchten in ihrer Studie mit Zeigebewegungen unterschiedliche Anzahlen und Verteilungen von Trainingszielen, jedoch variierten sie diese beiden Größen nicht getrennt voneinander. Daher wurde in dem ersten Vorexperiment dieser Arbeit mit derselben Anzahl an Stimuli wie in einer der Gruppen bei Krakauer et al. (2000) gearbeitet, jedoch mit einer anderen räumlichen Verteilung. Erforscht wurde die Adaptation in verschiedenen Arbeitsbereichen und das Ausmaß des Transfers auf ungeübte Bewegungsrichtungen. Das Ergebnis sollte darüber Aufschluss geben, auf welche der beiden Größen bei der Erstellung eines Designs für Zeigebewegungen besonders geachtet werden muss.

#### 2.2.1.1 Spezielle Methodik

##### *Lernaufgabe*

Die LA dieses Experiments bestand aus der im allgemeinen Methodikteil beschriebenen Zeigeaufgabe. Die acht Zielpunkte waren dabei 12 cm vom Mittelpunkt entfernt. Allerdings waren die Punkte nicht gleichmäßig über den gesamten Kreisumfang verteilt, sondern jeweils vier Zielpunkte befanden sich in zwei gegenüberliegenden 45°-Bereichen (Abb. 7). Um Adaptation hervorzurufen, wurde die visuelle RM um 45° im oder gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Das bedeutet, dass sich das Fadenkreuz auf dem Bildschirm bei einer geraden Handbewegung nach oben entweder nach links oben oder nach rechts oben bewegte.

RM-Feld Störung	vorne / hinten (V / H)	links / rechts (L / R)
-45°-Rotation	 A	 C
+45°-Rotation	 B	 D

**Abb. 7: Gruppeneinteilung am ersten Testtag**

Je zwei Gruppen arbeiteten gegen und mit dem Uhrzeigersinn und in dem RM-Feld vorne / hinten und links / rechts. In der Grundbedingung waren die Zeigebewegungen relativ genau. Die Fadenzugbewegung, die in diesen Phasen der Handbewegung entsprach, erfolgte daher in dem gelben Bereich. Auch in der Adaptationsphase befanden sich die Zielpunkte an den dargestellten Positionen. Der rote Bereich gibt an, in welchem Bereich die visuelle RM der Fadenzugbewegung nach der jeweiligen 45°-Rotation erschien.

*Ablauf*

Die Episoden in diesem Experiment waren 30 Sekunden lang und die Pause zwischen den einzelnen Episoden betrug fünf Sekunden. Alle Probanden wurden randomisiert vier Gruppen (A-D, Abb. 7) mit je sechs Personen zugeteilt. Probanden der Gruppe A erhielten die Zielpunkte im RM-Feld V / H und es wurde eine -45°-Rotation in der Adaptationsphase benutzt. Gruppe B arbeitete im gleichen Feld, jedoch mit einer +45°-Rotation. Die Gruppen C und D erhielten die Zielpunkte in dem RM-Feld L / R. In Gruppe C war die Störung eine -45°-Rotation, in Gruppe D eine +45°-Rotation. Dieses Experiment fand an zwei aufeinanderfolgenden Tagen statt. Der erste Tag verlief wie in der experimentübergreifenden Methodik beschriebenen. Vor der Persistenzphase war eine fünfminütige Pause eingeschoben. Am zweiten Tag begannen alle Probanden mit einer Retentionsphase mit visueller RM von zehn Episoden, in der die gleichen Bedingungen galten wie am Vortag. Anschließend folgten 30 Episoden einer sogenannten Transferphase. Hier erhielten die Probanden die acht Zielpunkte in dem vorher ungeübten Feld (Tab. 2), so dass die Gruppen A und B nun in dem RM-Feld L / R arbeiteten und die Gruppen C und D im RM-Feld V / H. Die Drehrichtung der visuellen RM entsprach dabei der des Vortages. Beendet wurde das



Experiment mit einer zweiten Beständigkeitsphase von drei Episoden ohne visuelle RM.

	Gewöhnung	Grundbedingung		Adaptation	Beständigkeit 1	Auffrischung	Retention	Transfer	Beständigkeit 2
Phasennr.	keine Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
visuelle RM	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja	ja	nein
Störung	Gruppe A	Keine Störung		-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	-45°
	Gruppe B			+45°	+45°	+45°	+45°	+45°	
	Gruppe C			-45°	-45°	-45°	-45°	-45°	
	Gruppe D			+45°	+45°	+45°	+45°	+45°	
RM-Feld	Gruppe A	V / H		V / H		V / H	L / R	L / R	
	Gruppe B	V / H		V / H		V / H	L / R	L / R	
	Gruppe C	L / R		L / R		L / R	V / H	V / H	
	Gruppe D	L / R		L / R		L / R	V / H	V / H	
Episodenzahl	3	3	3	30	3	3	10	30	3

**Tab. 2: Ablauf des Experiments A**

Die grauen vertikalen Linien kennzeichnen jeweils eine fünfminütige Pause, die schwarze vertikale Linie steht für den Beginn des zweiten Testtags.

### Auswertung

Die untersuchte abhängige Variable war der initiale Zeigefehler. Da die Fehlerwerte bei den beiden Gruppen, die an eine -45°-Rotation adaptiert haben, ab der Adaptationsphase negativ waren, wurden die Werte mit -1 multipliziert, um sie mit den anderen statistisch vergleichen zu können. Die erhobenen Daten wurden in einer dreifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholungen auf Signifikanzen untersucht. Hierbei wurden die Faktoren *Drehrichtung* (-45°, +45°), *RM-Feld* (V / H, L / R) und Anzahl der *Episoden* (3, 10 oder 30) sowie deren Interaktionen betrachtet.

Um den Transfer auf ungeübte Bewegungsrichtungen zu erforschen, wurde der prozentuale Wert des Transfers bestimmt. Hierbei wurde sowohl der Fehlerwert der ers-

ten Adaptationsepisode als auch der ersten Transferepisode und die Größe der Adaptationsverbesserung berücksichtigt (Gl. 2). Mit dem errechneten prozentualen Transferwert eines jeden Probanden wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren *Drehrichtung* und *Feld* durchgeführt.

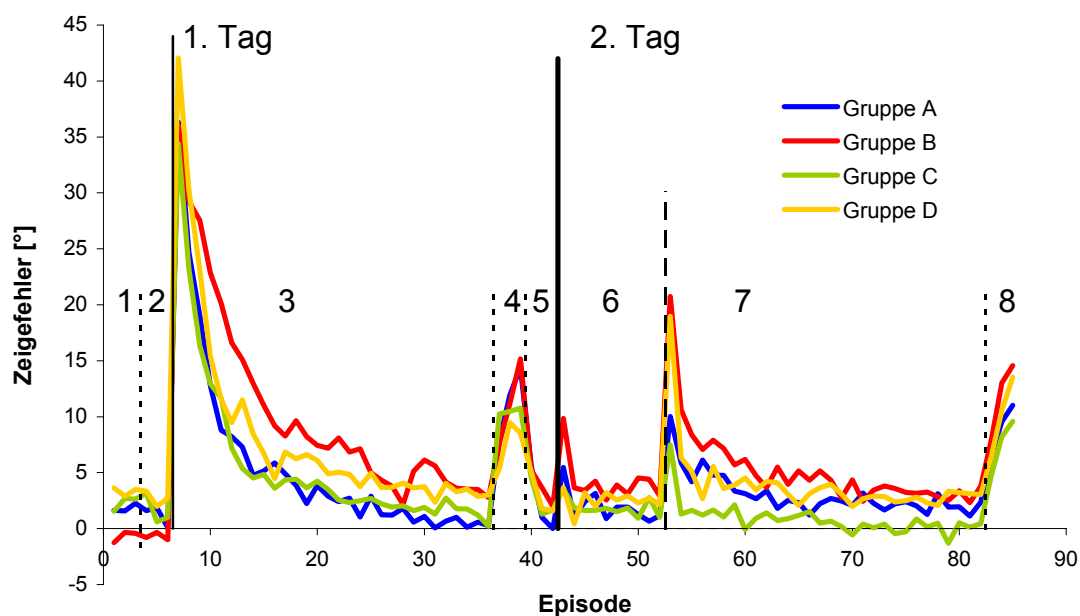
$$\text{Transfer} [\%] = \frac{I - T}{I - R} * 100$$

### Gl. 2: Gleichung für die Berechnung des prozentualen Transfers

*I* steht für den ersten Fehlerwert (Median) der Adaptation, *T* für den ersten Fehlerwert (Median) des Transfers und *R* für Mittelwert der letzten fünf Mediane der Retention.

#### 2.2.1.2 Ergebnisse

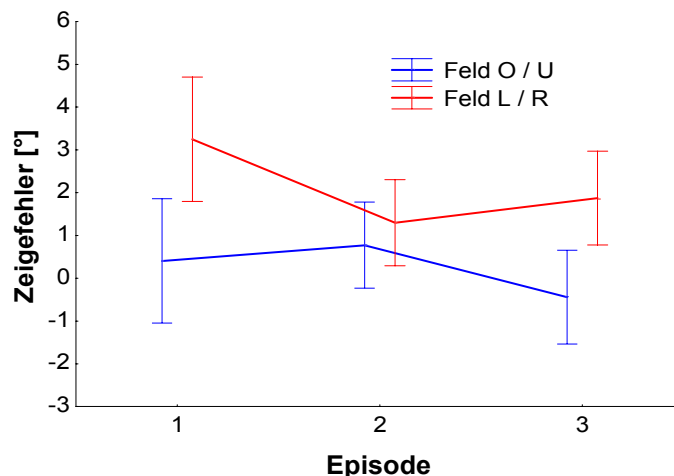
Die Rohdaten dieses Experiments waren vergleichbar mit den in Abb. 4 dargestellten, mit dem Unterschied, dass die Rotation  $+45^\circ$  oder  $-45^\circ$  betrug und nicht  $+60^\circ$ . Alle Probanden konnten in der Grundbedingung die gestellte Aufgabe erfüllen und zeigten relativ genau und gerade zu den Zielpunkten (Abb. 8, Episoden 1-6).



### Abb. 8: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers der vier Gruppen A-D

Jede Kurve stellt die Mittelwerte über die Mediane aller sechs Probanden der jeweiligen Gruppe in der entsprechenden Episode dar. Standardabweichungen sind aus Gründen der Übersicht hier nicht dargestellt, sind aber im Anhang A tabellarisch aufgeführt. Gepunktete vertikale Linien kennzeichnen die Änderung der visuellen RM, die dünne durchgezogene Linie stellt den Beginn der ersten Störung dar. Die dicke Linie steht für den Beginn des zweiten Tages, die Strichellinie weist auf die Änderung der Störung hin. Die Zahlen 1-8 entsprechen den Nummern der einzelnen Phasen.

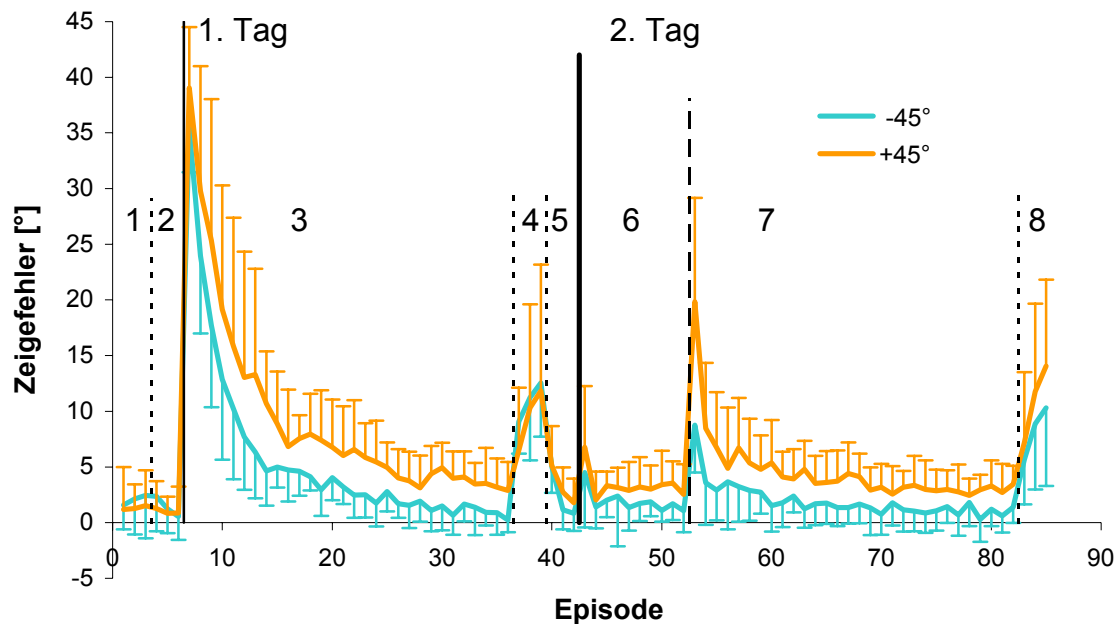
In der Phase ohne visuelle RM ergab die ANOVA eine Signifikanz für den Faktor Feld ( $F_{1,20} = 4.85^*$ ), wobei das Feld V / H niedrigere Fehlerwerte aufzeigte als das Feld L / R ( $0.58^\circ$  gegenüber  $2.81^\circ$ ). Die Grundbedingung mit visueller RM wies drei Signifikanzen auf: Innerhalb des Faktors Feld ( $F_{1,20} = 7.25^*$ ) war V / H mit  $0.24^\circ$  erneut niedriger als L / R mit  $2.14^\circ$ . Außerdem ergab die ANOVA eine Signifikanz für den Faktor Episode ( $F_{2,40} = 5.17^*$ ). Der Post hoc-Test zeigte, dass der Wert der ersten Episode mit  $1.82^\circ$  signifikant höher war als die Werte der beiden anderen mit  $1.03^\circ$  und  $0.71^\circ$  ( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ). Weiterhin ergab sich eine Interaktion zwischen den Faktoren Episode und Feld ( $F_{2,40} = 5.83^{**}$ ). Der Post hoc-Test (Abb. 9) verdeutlichte, dass sich die erste Episode von Feld L / R signifikant von allen anderen unterschied ( $p < 0.01$ ,  $p < 0.001$ ) und die dritte Episode im Feld V / H sich signifikant von der zweiten Episode beider Felder ( $p < 0.01$ ,  $p < 0.001$ ) unterschied.



**Abb. 9: Ergebnis des Post hoc-Tests**

Gezeigt ist die signifikante Interaktion von Feld (V / H und L / R) und Episode (1-3) in der Grundbedingung mit RM.

Mit Beginn der Störung nahm der Zeigefehler in allen Gruppen zu und verringerte sich im Laufe der Adaptationsphase wieder. Diese Beobachtung wurde von der ANOVA mit einer Signifikanz des Faktors Episode bestätigt ( $F_{5.1,102.4} = 95.27^{***}$ ). Darüber hinaus ergab die ANOVA einen signifikanten Unterschied für den Faktor Drehrichtung ( $F_{1,20} = 11.20^{**}$ ). Der Fehlerwert für die Drehrichtung  $-45^\circ$  war dabei geringer ( $5.68^\circ$ ) als der für  $+45^\circ$  ( $9.38^\circ$ ). Um diesen Unterschied deutlicher darzustellen, wurden in Abb. 10 die Fehlerwerte der Gruppen A und C, die an eine  $-45^\circ$ -Drehung adaptierten, und die der Gruppen B und D, die an  $+45^\circ$  adaptierten, jeweils in einer Kurve zusammengefasst.



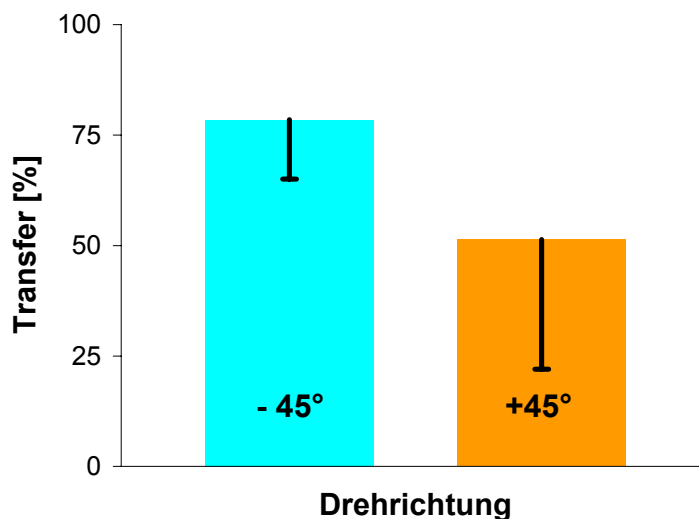
**Abb. 10: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers der beiden Gruppen  $-45^\circ$  und  $+45^\circ$**

Die Gruppen wurden auf Grund der Drehrichtung ihrer visuellen Störung zusammengefasst. A und C bilden die Gruppe  $-45^\circ$ , B und D die Gruppe  $+45^\circ$ . Jede Kurve stellt die Mittelwerte über die Mediane aller zwölf Probanden der jeweiligen Gruppe in der entsprechenden Episode dar. Die Balken geben die Standardabweichung wieder. Erklärung der vertikalen Linien und der Zahlen siehe Abb. 8.

In der ersten Persistenzphase nahm der Fehler geringfügig zu, ohne sich zwischen den Gruppen voneinander zu unterscheiden. Diese Beobachtung wurde von der ANOVA durch die einzige Signifikanz für den Faktor Episode ( $F_{1,58,31.62} = 7.65^{**}$ ) bestätigt. In der Auffrischungsphase sank der Fehler erneut auf das Plateau der Adaptationsphase. Am zweiten Tag, in der Retentionsphase, reduzierte sich der Zeigefehler nach einem erhöhten Anfangswert wieder auf das Niveau des Vortages, wobei erneut ein Gruppenunterschied auftrat. Übereinstimmend mit den Beobachtungen ergaben sich Signifikanzen für den Faktor Drehrichtung ( $F_{1,20} = 5.84^*$ ) und den Faktor Episode ( $F_{4,77,95.46} = 7.51^{***}$ ). Bei der Drehrichtung zeigte sich erneut für die Gruppen, die an  $-45^\circ$  adaptiert hatten, ein geringerer Fehlerwert ( $1.91^\circ$  gegenüber  $3.38^\circ$ ). Zu Beginn des Transfers auf das ungeübte Feld stieg bei allen Gruppen der Fehler in der ersten Episode auf unterschiedliche Werte an, bevor er steil abfiel. Diese Beobachtung wurde durch die ANOVA unterstützt, die eine Signifikanz für alle Faktoren ergab (Drehrichtung:  $F_{1,20} = 13.12^{**}$ , Feld:  $F_{1,20} = 5.93^*$ , Episode:  $F_{7,46,149.29} = 26.70^{***}$ ). Bei der Drehrichtung war erneut die  $-45^\circ$ -Gruppe besser ( $1.93^\circ$ ) als die  $+45^\circ$ -Gruppe ( $4.53^\circ$ ) und die Gruppe mit dem Feld V / H wies einen geringeren Zeigefehler auf als die mit dem Feld L / R ( $2.36^\circ$  gegenüber  $4.11^\circ$ ). Weiterhin ergab sich eine signifikante

Interaktion von Episode und Drehrichtung ( $F_{7.46,149.29} = 4.11^{***}$ ), die in Abb. 9 in den Episoden 52-82 bereits deutlich wurde. In der zweiten Persistenzphase zeigte sich, wie bereits in der ersten Persistenzphase, ein leichter Anstieg der Fehlerwerte ( $6.42^\circ$ ,  $10.34^\circ$ ,  $12,18^\circ$ ). Die einzige Signifikanz ergab sich hier für den Faktor Episode ( $F_{1.66,33.34} = 19.41^{***}$ ).

Zur genauen Überprüfung der Transferleistung der Probanden von dem Feld V / H auf L / R und umgekehrt, wurde mit Hilfe der Gleichung 2 der prozentuale Transfer bestimmt. Die ANOVA ergab hier nur eine Signifikanz für den Faktor Drehrichtung, wobei die  $-45^\circ$ -Gruppe einen höheren Transfer aufwies als die  $+45^\circ$ -Gruppe (Abb. 11).



**Abb. 11: Prozentualer Transfer auf das ungeübte Feld**

Dargestellt ist der prozentuale Transfer der Adaptation an die jeweilige Drehung auf das ungeübte Feld. 100% hieße, dass der Transfer vollständig wäre, bei 0% hätte kein Transfer stattgefunden.

### 2.2.1.3 Diskussion

Die vorliegenden Daten zeigen, dass alle Probanden die gestellte Aufgabe erfüllen und sowohl gerade als auch genau zu den Zielpunkten zeigen konnten. In den beiden Phasen der Grundbedingung lagen die Fehlerwerte nahe der Nulllinie, wodurch gezeigt wurde, dass auch ohne visuelle RM genaue Bewegungen ausgeführt werden konnten. Somit wurde die open-loop Theorie bestätigt. In diesen sechs Episoden zeigte sich, dass geringere Fehlerwerte in dem Feld V / H auftraten als in dem Feld L / R. Sowohl diese Ergebnisse als auch diejenigen von Wicker (2005) konnten somit nicht die Interpretation von van Beers et al. (2002) bestätigen, dass die Propriozeption

tion (hier besonders gefordert in der Bedingung ohne visuelle RM) und die visuelle Kontrolle in verschiedenen Bewegungsrichtungen unterschiedlich gut sind. In dem Fall hätte in der ersten Grundbedingung das Feld V / H und in der Bedingung mit visueller RM das Feld L / R bessere Werte aufweisen müssen. Die Unterschiede in diesem Experiment könnten dagegen in der Anatomie der Versuchspersonen begründet liegen. Bei Zeigebewegungen von 12 cm nach vorne und hinten (Feld V / H) kann der Arm sich auf der Sagittalachse parallel neben dem Körper bewegen, während bei Bewegungen nach links und rechts (Feld L / R) der Ellenbogen auf der Transversalachse entweder vom Körper entfernt oder zu ihm hin bewegt wird. Letztere Bewegungen scheinen ungenauer zu sein als erstere. In der Grundbedingung mit RM zeigte sich darüber hinaus eine signifikante Abnahme des Fehlerwertes über die drei Episoden. Das weist darauf hin, dass die Probanden zuerst von der erneut auftretenden visuellen RM irritiert waren und wieder lernen mussten, mit ihr zu arbeiten und sie zu nutzen. An die Rotation der visuellen RM adaptierten alle Probanden in bekannter Weise, mit einem exponentiellen Verlauf der Fehlerwinkelkurve (Abeele und Bock 2001a; Wang und Sainburg 2004). Im Gegensatz zu Krakauer et al. (2000), die bei einer Adaptation an eine +30°-Rotation mit acht Zielpunkten einen Endfehler von 10° und somit keine vollständige Adaptation fanden, war die Adaptation in diesem Experiment mit einem durchschnittlichen Endfehler von 2.3° vergleichbar mit der Adaptation an nur ein Ziel in der Studie von Krakauer et al. (2000), bei der ein Endfehler von ca. 4° erreicht wurde. Die Autoren begründeten den Unterschied in ihrer Studie mit der unterschiedlichen Anzahl an Bewegungen pro Ziel. Es kann demnach angenommen werden, dass die Bewegungsanzahl in dem Experiment der vorliegenden Arbeit ausreichend war, um selbst bei acht Zielen eine vollständige Adaptation zu erreichen. In dieser Adaptationsphase trat ein Unterschied zwischen den beiden Drehrichtungen auf, jedoch nicht mehr zwischen den Feldern. Dies könnte bedeuten, dass durch die hohen Standardabweichungen zu Beginn dieser Phase die Bewegungen über die beiden Felder verteilt waren und somit der Faktor Feld nicht mehr signifikant war. Die Signifikanz des Faktors Drehrichtung zeigt, dass die Adaptation an eine Rotation der visuellen RM im Uhrzeigersinn leichter ist. Eine solche Rotation bedeutet, dass die Probanden ihre Handbewegungen gegen den Uhrzeigersinn drehen müssen, um mit dem Fadenkreuz die Ziele zu treffen. Die Kreisbewegung zum Körper hin scheint demnach favorisiert zu sein gegenüber der vom Körper weg. Dies kann auch beo-

bachtet werden, wenn Rechtshänder einen Tisch abwischen oder Fenster putzen, da dort vornehmlich gegen den Uhrzeigersinn gearbeitet wird. Außerdem benutzt unsere Schreibschrift häufiger Bewegungen gegen als mit dem Uhrzeigersinn (z. B. bei den Buchstaben a, d, e, l, o, q), auch wenn wir von links nach rechts schreiben. Eine weitere Begründung könnte in der Anatomie unseres Schultergelenks liegen, da die Außenrotation, die bei Bewegungen mit dem Uhrzeigersinn gemacht wird, bekanntermaßen weniger frei ist ( $40^{\circ}$ - $60^{\circ}$ ) als die Innenrotation ( $95^{\circ}$ ). In der ersten Persistenzphase nahm der Fehlerwinkel zwar geringfügig zu, doch blieb er weit unter dem Anfangswert. Demnach erfolgte die Adaptation zu einem großen Teil durch Rekalibrierung und nicht nur durch visuelle Kontrolle. Hier ergab sich kein Unterschied mehr zwischen den beiden Drehrichtungen. Dies kann bedeuten, dass die größere Verbesserung der Gruppe, die an  $-45^{\circ}$  adaptiert hat, durch Strategien und visuelle Kontrolle entstanden war und ohne visuelle RM nicht gehalten werden konnte. Das Ausmaß der Rekalibrierung scheint in beiden Gruppen daher gleich gewesen zu sein. Sowohl in der Retention als auch in dem Transfer war in beiden Gruppen nur die erste Episode verschlechtert, anschließend verbesserte sich die Genauigkeit wieder, wobei sich die Werte bei dem Anstieg und dem anschließenden Abfall zwischen den Gruppen unterschieden. In beiden Phasen trat erneut ein Gruppenunterschied auf, wobei die  $-45^{\circ}$ -Gruppe erneut geringere Fehlerwerte aufwies. Dieses Ergebnis deutet im Gegensatz zu dem der Persistenzphase darauf hin, dass diese Gruppe die vollständigere Adaptation doch durch Rekalibrierung erreicht hat und das Gelernte über Nacht behalten (Bock et al. 2001), bzw. es auf andere Arbeitsbereiche übertragen konnte (Krakauer et al. 2000, Wang und Sainburg 2004). In der Transferphase trat darüber hinaus erneut ein Unterschied zwischen den beiden Feldern V / H und L / R auf. Somit ist die Armbewegung auf der Sagittalachse leichter und genauer als auf der Transversalachse. Die Interaktion zwischen Episode und Drehrichtung kann durch den hohen Anfangswert und den anschließenden sehr steilen Abfall der Fehlerwerte der  $+45^{\circ}$ -Gruppe erklärt werden. Die Berechnung des prozentualen Transfers ergab einen nicht vollständigen Transfer in beiden Gruppen, und dass die  $-45^{\circ}$ -Gruppe das Gelernte besser übertragen konnte. Da in der Formel das Ausmaß der Adaptation einbezogen wurde, kann der bessere Transfer nicht nur deshalb entstanden sein, weil die Fehlerwerte in der Adaptationsphase ebenfalls geringer waren. Vielmehr scheint es so zu sein, dass die alltäglichen Bewegungen zum Körper hin

den ganzen Arbeitsbereich abdecken. In der zweiten Persistenzphase nahmen die Fehlerwerte geringfügig zu und es ergab sich erneut kein Unterschied zwischen den Gruppen. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass der Anteil der durch Rekalibrierung erreichten Adaptation in beiden Rotationsrichtungen gleich ist, und dass der Unterschied, der in der Adaptations-, der Retentions- und der Transferphase auftrat auf die Verbesserungen durch visuelle Kontrolle zurückzuführen ist.

Da sich in der Adaptations- und der Retentionsphase kein Unterschied zwischen den Feldern ergab, scheint es für das Ausmaß des Lernens egal zu sein, wo und wie die Stimuli angeordnet sind. Für den Transfer dagegen spielt die Richtung, in die die Bewegung erfolgt, eine Rolle. Diese Ergebnisse widersprechen denen von Bock (1992) und Krakauer et al. (2000), die bei einer Änderung des Verhältnisses der aktuellen Bewegung und der visuellen RM eine richtungsunabhängige Generalisierung auf den gesamten Arbeitsbereich fanden. Bei der Studie von Krakauer et al. (2000) ergab sich darüber hinaus ein vollständiger Transfer auf ungeübte Richtungen bei der Adaptation an acht Ziele. Da sich die Zielpunkte gleichverteilt auf einer Kreisbahn befanden, war der Abstand der ungeübten Zielpunkte jedoch nur  $22.5^\circ$  zu den geübten. In der vorliegenden Studie betragen die Abstände zu den geübten Zielen  $45^\circ$ - $90^\circ$ . Da die Ziele gleich häufig vorkamen, war der durchschnittliche Abstand somit  $67.5^\circ$ . Dieser Abstand wurde bei der Studie von Krakauer et al. (2000) nicht untersucht. Bei der Adaptation an zwei Stimuli wurde allerdings der Transfer an  $45^\circ$  und  $90^\circ$  entfernte Ziele untersucht und es wurden ca. 56% und 37% Transfer (abgelesene Werte) gemessen. Der errechnete Transfer bei  $67.5^\circ$  Abstand ergab 46.5%. Da bei Krakauer et al. (2000) eine Rotation gegen den Uhrzeigersinn untersucht wurde, wird an dieser Stelle nur der entsprechende Wert des vorliegenden Experiments mit deren Ergebnis verglichen. Somit stehen 51.35% Transfer 46.5% gegenüber. Auch wenn dieser Unterschied nicht groß ist, so sieht es dennoch danach aus, dass für das Ausmaß des Transfers eher die Anzahl der Stimuli als deren Verteilung von Bedeutung ist.

Insgesamt gesehen war die Adaptation an die acht Ziele vollständig und das Gelernte konnte auf neue Bewegungsrichtungen übertragen werden. Auch wenn der Unterschied zu den Ergebnissen der Adaptation an vier Ziele von Krakauer et al. (2000) nicht gravierend ist, werden für folgende Zeigeeperimente acht Ziele empfohlen. Um Auswirkungen von verschiedenen Arbeitsbereichen zu vermeiden, sollten die Ziele



auf einer Kreisbahn gleichverteilt und jeweils gleich häufig präsentiert werden. Ein weiterer Vorteil der Gleichverteilung auf der Kreisbahn gegenüber zwei 45°-Bereichen ist der größere Abstand der Zielpunkte zueinander. Dadurch werden die Aussagen eindeutiger, da die Abweichungen nicht im Rauschen untergehen. Ein wichtiger Hinweis, der aus diesem Experiment nebenbei hervorging, war die Beachtung der Drehrichtung. Auch wenn weitere Experimente speziell für die Erforschung dieses Befunds vorgenommen werden sollten, scheint es bei dem Vergleich und dem Aufbau von Experimenten wichtig zu sein, die Drehrichtung der Rotation der visuellen RM zu beachten. Wäre hier beispielsweise der Mittelwert des Transfers genommen worden (62.9%), so schiene der Vergleich fälschlicherweise viel vorteilhafter für die Anzahl der Ziele.

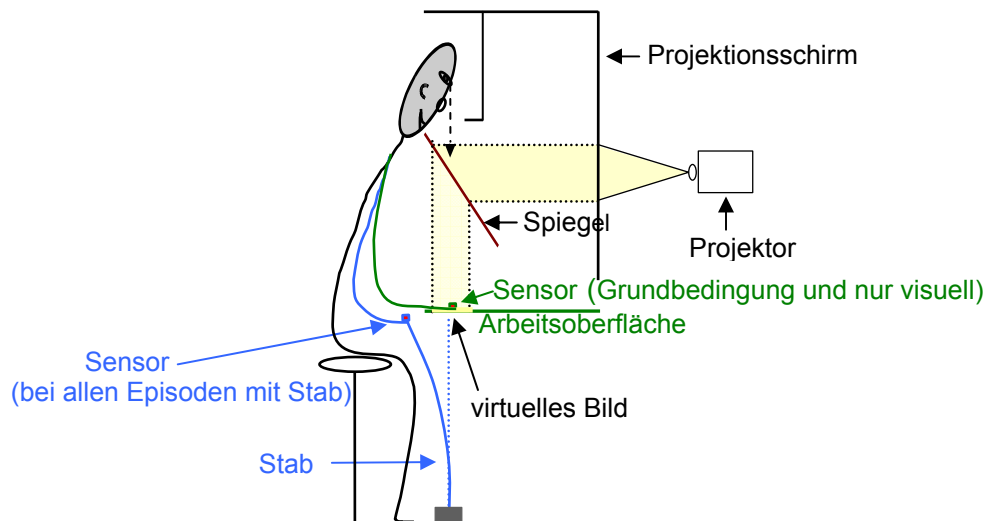
Für die Zeigeeexperimente dieser Arbeit bedeuten diese Ergebnisse, dass acht auf einer Kreisbahn gleichverteilte und gleich häufig präsentierte Zielpunkte benutzt werden. Darüber hinaus werden Rotationen gegen den Uhrzeigersinn benutzt, um möglichst die Adaptation auf Grund von Rekalibrierung und nicht auf Grund strategischer Anpassung und visueller Kontrolle zu untersuchen.

### 2.2.2 Erprobung eines elastischen Stabes als mechanische Störung

Als mechanische Störungen wurden in früheren Studien anderer Institute häufig Kraftfelder oder Roboteraufbauten genutzt (Shadmehr und Brashers-Krug 1997, Tong et al. 2002). Da eine solche Möglichkeit in der Arbeitsgruppe Bewegungsphysiologie der Deutschen Sporthochschule Köln nicht gegeben war und bisher nur mit visuellen Störungen gearbeitet wurde, sollte eine möglichst unkomplizierte und einfache mechanische Störung erprobt werden. Ziel dieses Vorexperiments war es daher, zu untersuchen, ob ein elastischer Stab, dessen Rückstellkraft als positionsabhängige mechanische Störung entgegen der Bewegungsrichtung wirkte, zu sinnvollen und aussagekräftigen Ergebnissen und Adaptationskurven führt. Um mit diesem Experiment eine weitere Fragestellung zu beantworten, wurde die Adaptation an den elastischen Stab und eine visuelle Drehung in Komposition (Adaptation an eine der beiden Störungen, danach zweite Störung hinzufügen) und in Dekomposition (Adaptation an beide Störungen gleichzeitig, danach nur noch eine der beiden) untersucht. Es wurden schon mehrere Experimente mit sukzessiven Präsentationen von verschiedenen Störungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten dabei je nach Versuch eine Erleichterung, keinen Einfluss oder eine Erschwerung der zweiten Adaptation. Wenige Experimente jedoch wurden mit gleichzeitiger Adaptation an zwei Störungen durchgeführt. Krakauer et al. (1999) und Flanagan et al. (1999) untersuchten zwar jeweils die Kombination einer visuellen und einer mechanischen Störung, doch handelte es sich in beiden Fällen um eine positionsabhängige visuelle Störung und um eine nicht-positionsabhängige mechanische Störung, die in dieselbe Richtung wirkten. Vorherige Studien zeigten, dass besonders die Art der Störung einen Einfluss auf die Interferenz hat. Es ist jedoch möglich, dass sich auch die Richtung der Störung auswirkt. Daher ist es von Interesse, zu untersuchen, wie sich die Komposition und Dekomposition der Adaptation an zwei unterschiedliche positionsabhängige Störungen verhält, wenn beide Störungen in unabhängige Bewegungsrichtungen wirken. In diesem Experiment sollte daher nicht nur der Stab als mechanische Störung erprobt, sondern auch die Adaptation und die gegenseitige Beeinflussung der Adaptation an eine mechanische und eine visuelle Störung sowohl in Dekomposition als auch in Komposition erforscht werden.

### 2.2.2.1 Spezielle Methodik

Bei diesem Vorexperiment führten die Probanden Zeigebewegungen zu acht gleichmäßig auf einer Kreisbahn verteilten Zielpunkten in 12 cm Entfernung aus. Sie arbeiteten entweder auf der horizontalen Arbeitsfläche oder sie umfassten in Höhe der Arbeitsfläche mit ihrer Hand das obere Ende eines im Boden verankerten Stabes an dessen oberen Ende der Sensor befestigt war (Abb. 12).



**Abb. 12: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus in Experiment B**

Ein Computerbild wurde von einem Projektor über einen Projektionsschirm dargestellt. Die Probanden sahen dieses virtuelle Bild über einen Spiegel, so dass es für sie auf der horizontalen Arbeitsebene erschien. Sie arbeiteten entweder mit ihrem dominanten Zeigefinger, auf dem ein Sensor befestigt war, oder umfassten einen Stab mit der dominanten Hand, an dessen oberem Ende der Sensor befestigt war.

#### *Lernaufgabe*

Die Adaptation wurde entweder induziert durch eine visuelle Störung in Form einer  $+60^\circ$ -Drehung der visuellen RM und / oder eine mechanische Störung in Form des elastischen Stabes. Die  $+60^\circ$ -Rotation hatte zur Folge, dass sich das Fadenkreuz auf dem Bildschirm nach schräg links oben in Richtung 10 Uhr bewegte, wenn sich die Hand nach oben in Richtung 12 Uhr bewegte. Die zu überwindende Rückstellkraft des Stabes wurde experimentell ermittelt und betrug für den Weg von 12 cm 60 N.

#### *Ablauf*

Die Episodenlänge betrug 30 Sekunden und die Pausen zwischen den einzelnen Episoden waren zehn Sekunden lang. Diese im Vergleich zu den anderen Experimenten

große Pausenlänge wurde gewählt, um der muskulären Ermüdung durch die Benutzung des Stabes vorzubeugen. Das Experiment wurde von jedem Probanden an einem Tag durchgeführt. Alle Probanden wurden randomisiert vier gleich großen Gruppen zugeordnet. Die Störungen wurden je nach Gruppe und Phase entweder einzeln oder in Kombination durchgeführt (Tab. 3). In der Adaptationsphase 1 begannen zwei der Gruppen mit der Kombination und wurden danach (Adaptation 2) nur der visuellen (Gruppe dekovis) bzw. nur der mechanischen Störung (Gruppe dekomec) ausgesetzt. Diese Gruppen wurden zusammengefasst als Dekompositionsgruppe bezeichnet. Die beiden anderen Gruppen bildeten die Kompositionsgruppe und erhielten die Aufgaben in umgekehrter Reihenfolge, so dass sie in der Adaptation 1 erst jeweils mit einer Einzelstörung, visuell (kompovis) oder mechanisch (kompomec), begannen und danach der Kombination beider Störungen (Adaptation 2) ausgesetzt wurden. Nach fünfminütiger Pause folgte nach Adaptation 1 mit derselben Störung die Persistenzphase und die Auffrischungsphase. Anschließend ging es am selben Tag direkt mit der anderen Störung in Adaptation 2 für 30 Episoden weiter, bevor sich erneut eine Persistenzphase von drei Episoden ohne visuelle RM mit derselben Störung wie in der Adaptation 2 anschloss.

	Gewöhnung	Grundbedingung		Adaptation 1	Persistenz 1	Auffrischung	Adaptation 2	Persistenz 2
Phasennr.	keine Nr.	1	2	3	4	5	6	7
visuelle RM	ja	nein	ja	ja	nein	ja	ja	nein
Störung	kompovis	Keine Störung		+60°	+60°	Stab & +60°	Stab & +60°	
	kompomec			Stab	Stab	Stab & +60°	Stab & +60°	
	dekovis			Stab & +60°	Stab & +60°	+60°	+60°	
	dekomec			Stab & +60°	Stab & +60°	Stab	Stab	
Episodenzahl	3	3	3	30	3	3	30	3

**Tab. 3: Ablauf des Experiments B**

Die grauen vertikalen Linien kennzeichnen jeweils eine fünfminütige Pause.

### Auswertung

Da bei diesem Experiment die Erprobung einer neuen mechanischen Störung im Vordergrund stand, wurde nicht nur der Fehlerwinkel als Variable zur Beschreibung der Adaptation untersucht. Als weitere Variablen wurden die lineare Distanz und die maximale Geschwindigkeit ausgewählt, um zu prüfen, welches eine sinnvolle Variable für die Beschreibung der Adaptation an den Stab ist. Gewählt wurden diese beiden Variablen, da dort der größte Effekt der mechanischen Störung erwartet wurde, deren Rückstellkraft entgegen der Bewegungsrichtung wirkte. Die lineare Distanz bezeichnete dabei die kürzeste Verbindung zwischen dem individuellen Start- und Endpunkt der Bewegung der Probanden. Alle Variablen wurden mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholungen ausgewertet. Betrachtet wurden dabei die Faktoren *Gruppe* (kompovis, kompomec, dekovis, dekomec) und *Anzahl der Episoden* (3, 10 oder 30) sowie deren Interaktion. Außerdem wurden die Auswirkungen von Komposition und Dekomposition der Störungen untersucht. Dafür mussten die Werte der einen Gruppe mit denen der anderen verglichen werden, da innerhalb der jeweiligen Gruppe nicht alle benötigten Werte vorliegen konnten. Um die Ergebnisse mit denen von Flanagan et al. (1999) vergleichen zu können, deren Initial- und Endwert jeweils über 100 Bewegungen berechnet wurde, wurde in diesem Experiment der Mittelwert über jeweils vier Episoden als Initial- und Endwert benutzt, da er so ebenfalls ungefähr 100 Bewegungen beinhaltet. Für die Berechnung des Kompositions Vorteils wurde der Initialwert der zweiten Adaptationsphase der Gruppe kompovis und der Initialwert der ersten Adaptationsphase der Gruppen dekovis verglichen. Der Dekompositions Vorteil wurde durch den Vergleich des Initialwerts der ersten Adaptationsphase der Gruppe kompovis und des Initialwerts der zweiten Adaptationsphase der Gruppe dekovis bestimmt. Um das Ausmaß der Adaptation in der ersten Adaptationsphase einzubeziehen, wurde folgende Formel benutzt (Gl. 3):

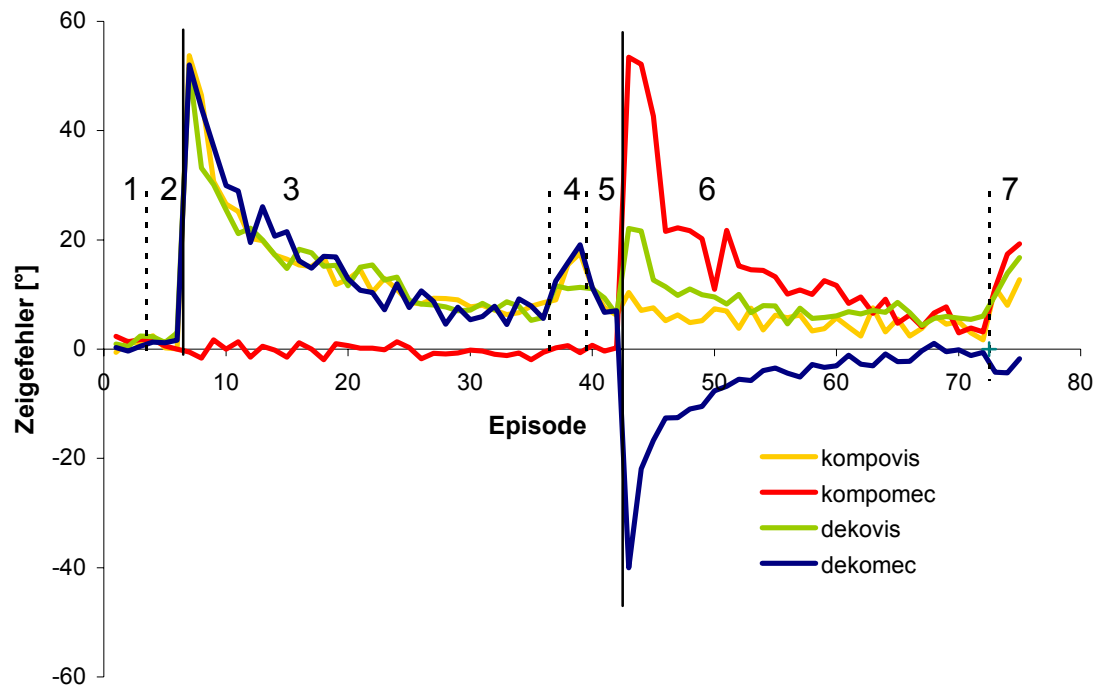
$$\text{Vorteil [\%]} = \frac{(I_1 - I_2)}{(I_1 - E_1)} * 100$$

#### Gl. 3: Gleichung für die Berechnung des Kompositions- und Dekompositions Vorteils

$I_1$  und  $I_2$  sind die arithmetischen Mittelwerte der ersten vier Episoden der ersten bzw. der zweiten Adaptationsphase,  $E_1$  ist der arithmetische Mittelwert der letzten vier Episoden der ersten Adaptationsphase.

## 2.2.2.2 Ergebnisse

Die Rohdaten von Originalbewegungen zu drei der acht Ziele zeigt die Abb. 4 in der experimentübergreifenden Methodik. Aus diesen Rohdaten wurde für jede Episode eines jeden Probanden sowohl der Zeigefehler als auch die lineare Distanz und die Maximalgeschwindigkeit berechnet. Für die genannten Variablen wurden die Mittelwertkurven über alle Probanden der jeweiligen Gruppen gebildet (Abb. 13-15).

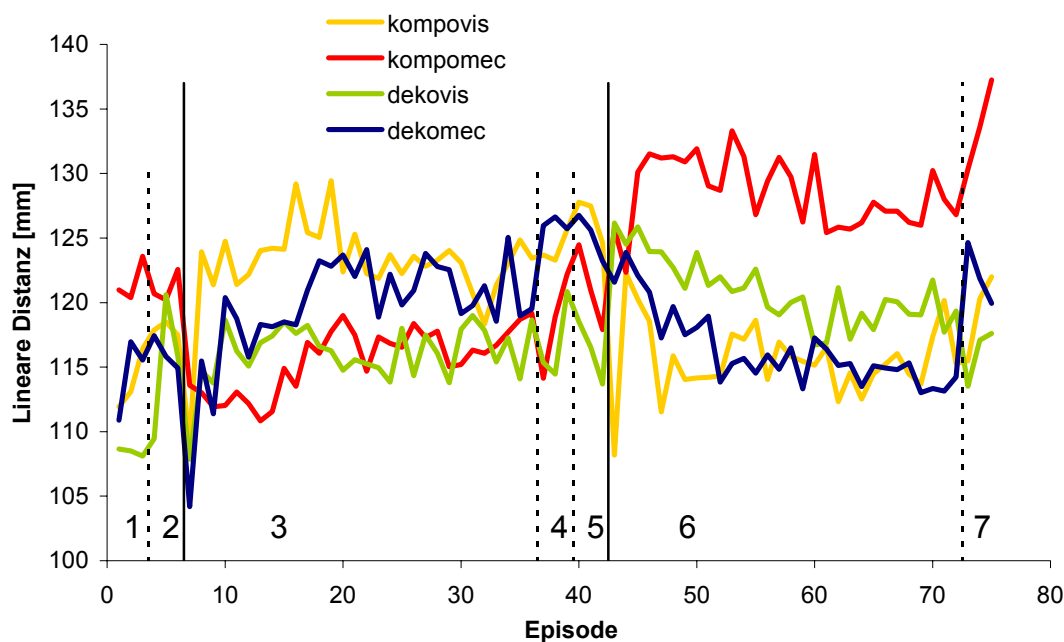


**Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers der vier Gruppen**

Jede Kurve stellt die Mittelwerte über die Mediane aller sechs Probanden der jeweiligen Gruppe in der entsprechenden Episode dar. Standardabweichungen sind aus Gründen der Übersicht hier nicht dargestellt, sind aber im Anhang B tabellarisch aufgeführt. Gepunktete vertikale Linien kennzeichnen die Änderung der visuellen RM, die dünne durchgezogene Linie stellt den Beginn der ersten Störung dar. Die dicke Linie steht für den Beginn des zweiten Tages, die Strichellinie weist auf die Änderung der Störung hin. Die Zahlen 1-7 entsprechen den Nummern der einzelnen Phasen.

In den beiden Phasen der Grundbedingung ohne und mit visueller RM war der Zeigefehler gering (Abb. 13) und es ergaben sich keine Signifikanzen. Mit Beginn der Phase der Adaptation ergab sich für die drei Gruppen, die mit einer visuellen Störung arbeiteten, ein starker Anstieg des Fehlerwinkels. Eine Signifikanz für den Faktor Gruppe ( $F_{3,20} = 14.04^{***}$ ) und der anschließende Post hoc-Test, bei dem sich nur die Gruppe kompomec signifikant von den drei anderen unterschied (alle  $p < 0.001$ ) sowie Signifikanzen für den Faktor Episode ( $F_{6,4,128.78} = 57.63^{***}$ ) und die Interaktion Gruppe

x Episode ( $F_{19,31,128,78} = 7.1^{***}$ ) bestätigten diese Beobachtung. Die Phase der ersten Persistenz wies nur eine Signifikanz für den Faktor Episode auf ( $F_{2,40} = 4.52^*$ ), wobei der Post hoc-Test zeigte, dass die Fehlerwerte der ersten Episode ( $8.33^\circ$ ) signifikant geringer waren als die der zweiten und dritten ( $10.74^\circ$  und  $11.83^\circ$ ) ( $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ). In der zweiten Adaptationsphase zeigten sich Signifikanzen sowohl für die Faktoren Gruppe ( $F_{3,20} = 15.22^{***}$ ) und Episode ( $F_{6,13,122,76} = 5.34^{***}$ ) als auch für deren Interaktion ( $F_{18,41,122,76} = 14.15^{***}$ ). Der Post hoc-Test des Faktors Gruppe ergab, dass sich die Gruppe dekomec signifikant von allen anderen unterschied und die Gruppe kompomec zusätzlich von der Gruppe kompovis. In der zweiten Persistenzphase zeigte die ANOVA Signifikanzen für die beiden Faktoren Gruppe ( $F_{3,20} = 10.33^{***}$ ) und Episode ( $F_{1,48,29,77} = 4.52^*$ ), nicht jedoch für deren Interaktion. Der Post hoc-Test des Faktors Gruppe zeigte, dass sich nur dekomec von allen anderen unterschied ( $p < 0.001$ ).

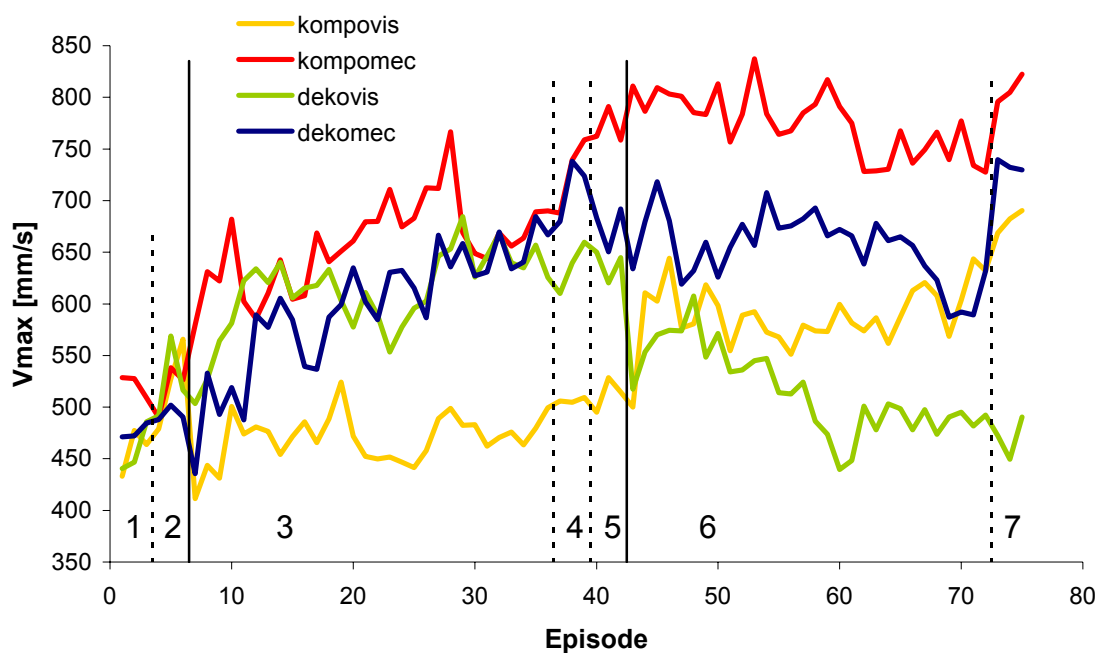


**Abb. 14: Zeitlicher Verlauf der linearen Distanz der vier Gruppen**

Jede Kurve stellt die Mittelwerte über die Mediane aller sechs Probanden der jeweiligen Gruppe in der entsprechenden Episode dar. Standardabweichungen sind aus Gründen der Übersicht hier nicht dargestellt, sind aber im Anhang B tabellarisch aufgeführt. Erklärung der vertikalen Linien und der Zahlen siehe Abb. 13.

Der zeitliche Verlauf der linearen Distanz ist in Abb. 14 dargestellt. In der ersten Phase der Grundbedingung ergab sich keine Signifikanz. In der Phase der Grundbedingung mit visueller RM zeigte sich eine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Gruppe und Episode ( $F_{6,40} = 3.51^{**}$ ). In der ersten Episode der Adaptationsphase

nahm die lineare Distanz zunächst ab, bevor sie in der zweiten Episode wieder steil anstieg und sehr variabel verlief. Es ergab sich nur eine Signifikanz für den Faktor Episode ( $F_{7,59,22.79} = 3.06^{**}$ ). Der Post hoc-Test zeigte, dass sich die lineare Distanz von 108.71 mm in der ersten Episode auf 116.78 mm in der zweiten bis zu 120.19 mm in der 30. Episode erhöhte. In der ersten Persistenzphase zeigten sich keine Signifikanzen. In der zweiten Adaptationsphase lagen die Werte der Gruppe kompomec oberhalb derer der anderen Gruppen. Diese Beobachtung wurde durch die ANOVA unterstützt, die eine Signifikanz für den Faktor Gruppe ( $F_{3,20} = 10.62^{***}$ ) ergab. Im Post hoc-Test wurde ein Unterschied von der Gruppe kompomec zu allen anderen ( $p < 0.01$ ,  $p < 0.001$ ) deutlich. Darüber hinaus ergab sich in dieser Phase eine Signifikanz für den Faktor Episode ( $F_{12,84,256.81} = 2.48^{**}$ ). Auch in der zweiten Persistenzphase wurde die Beobachtung durch die ANOVA gestützt, da der Faktor Gruppe eine Signifikanz aufwies ( $F_{3,20} = 4.02^*$ ), wobei sich die Gruppe kompomec erneut von allen anderen unterschied ( $p < 0.05$ ,  $p < 0.001$ ).



**Abb. 15: Zeitlicher Verlauf der Maximalgeschwindigkeit der vier Gruppen**

Jede Kurve stellt die Mittelwerte über die Mediane aller sechs Probanden der jeweiligen Gruppe in der entsprechenden Episode dar. Standardabweichungen sind aus Gründen der Übersicht hier nicht dargestellt, sind aber im Anhang B tabellarisch aufgeführt. Erklärung der vertikalen Linien und der Zahlen siehe Abb. 13.

Für die Maximalgeschwindigkeit, deren zeitlicher Verlauf in Abb. 15 dargestellt ist, ergaben sich in der Grundbedingung ohne visuelle RM keine Signifikanzen. In der



Grundbedingung mit RM zeigte sich eine Signifikanz für den Faktor Episode ( $F_{2,40} = 10.88^{***}$ ), wobei der Wert der ersten Episode signifikant niedriger war als der der beiden anderen ( $p < 0.001$ ). In der Adaptationsphase blieb die Geschwindigkeit der Gruppe kompovis unterhalb derer der anderen drei Gruppen. Diese Beobachtung wurde bestätigt durch die Signifikanz des Faktors Gruppe ( $F_{3,20} = 4.19^*$ ) und dem Ergebnis des Post hoc-Tests, der zeigte, dass sich nur die Gruppe kompovis signifikant von den anderen unterschied ( $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$ ). Darüber hinaus ergab sich ein signifikanter Effekt für den Faktor Episode ( $F_{7.13,142.76} = 3.56^{**}$ ), wobei die Werte von 482.44 mm/s auf 620.38 mm/s stiegen. Auch in der ersten Persistenzphase bestätigte die ANOVA die Beobachtungen, indem sie einen signifikanten Effekt für die Faktoren Gruppe ( $F_{3,20} = 4.78^*$ ) und Episode ( $F_{1.75,35.03} = 3.76^*$ ) ergab. Der Post hoc-Test für den Faktor Gruppe verdeutlichte, dass die Maximalgeschwindigkeit in der Gruppe kompovis signifikant unter der von kompomec und dekomec (beide  $p < 0.01$ ) lag. In der zweiten Adaptationsphase ergab sich nur eine Signifikanz und zwar für den Faktor Gruppe ( $F_{3,20} = 5.79^{**}$ ). Der Post hoc-Test zeigte, dass die Gruppe kompomec signifikant höhere Werte aufwies als die Gruppen kompovis ( $p < 0.01$ ) und dekovis ( $p < 0.001$ ). Außerdem zeigte dekomec signifikant höhere Werte als dekovis ( $p < 0.05$ ). In der zweiten Persistenzphase wurde erneut bestätigt, dass sich die Gruppen signifikant unterschieden ( $F_{3,20} = 7.03^{**}$ ) und die Gruppe dekovis dabei signifikant niedrigere Geschwindigkeiten aufwies als die anderen drei ( $p < 0.01$ ,  $p < 0.001$ ).

Die Berechnung des Kompositionsvorteils ( $V_{\text{kompo}}$ ) ergab einen Mittelwert von 97.70%, die des Dekompositionsvorteils ( $V_{\text{deko}}$ ) einen von 69.98% (siehe Anhang B). Eine einfaktorielle ANOVA ergab einen signifikanten Effekt für den Faktor Gruppe ( $F_{1,10} = 5.97^*$ ).

### 2.2.2.3 Diskussion

Die Adaptationskurve des Fehlerwinkels zeigt den aus früheren Studien bekannten Verlauf für die Adaptation an eine visuelle Drehung. In beiden Grundbedingungen konnten die Probanden aller Gruppen die Aufgabenstellung erfüllen und sie zeigten sowohl geradlinig als auch genau zu den Zielpunkten. Mit Beginn der ersten Adaptationsphase zeigte sich eine abrupte Erhöhung des Initialfehlers außer in der Gruppe

kompomec, die zu Beginn nur die mechanische Störung benutzte. Da diese in die Bewegungsrichtung wirkte und somit keinen Winkelfehler verursachte, zeigte sich erwartungsgemäß keine Erhöhung des Zeigefehlers. Der fehlende Unterschied zwischen den übrigen drei Gruppen wies darauf hin, dass es bezüglich des Zeigefehlers unwichtig war, ob der Stab als mechanische Störung gleichzeitig benutzt wurde oder nicht. In der Persistenz zeigte sich die bereits in früheren Studien beschriebene leichte Zunahme des Zeigefehlers, wobei die Werte weit unter dem Anfangsfehler blieben, so dass gezeigt werden konnte, dass die Adaptation durch Rekalibrierung entstanden ist. Der fehlende Gruppenunterschied kann auf die hohen Standardabweichungen (Anhang B) zurückgeführt werden. Mit Beginn der zweiten Adaptationsphase zeigte sich für die Gruppe dekomec durch das Ausschalten der Rotation der bekannte Deadaptationseffekt. Für die Gruppe kompomec, die nun erst mit der Rotation arbeiten musste, stieg der Zeigefehler erwartungsgemäß abrupt an. Die Probanden der Gruppe kompovis, bei denen nun der Stab hinzukam, behielten den niedrigen Zeigefehler bei, den sie am Ende der ersten Adaptationsphase erreicht hatten. Diese mechanische Störung schien das bzgl. des Richtungsfehlers Gelernte nicht zu beeinflussen. Die vierte Gruppe, dekovis, wurde in dieser zweiten Adaptationsphase nur noch der Rotation ausgesetzt, statt wie zuvor der Kombination der mechanischen und der visuellen Störung. Die Probanden dieser Gruppe begannen mit einem leicht höheren Fehler als am Ende der ersten Adaptationsphase. Das Entfernen des Stabes führte demnach zu einer Verschlechterung des bereits Gelernten. Eine mögliche Ursache hierfür ist die abrupte Verringerung der durch die Benutzung des Stabs vermehrten propriozeptiven Signale, die durch den Druck auf die Haut und die Arbeit gegen den Widerstand entstanden. Auch die zweite Persistenzphase zeigte, dass die Gruppen das Gelernte ohne visuelle RM nutzen konnten.

Es wurde erwartet, dass sich in der linearen Distanz der erhöhte Widerstand des Stabes, gegen den gearbeitet werden musste, bemerkbar macht. Daher schien die lineare Distanz bei der Planung des Experiments eine geeignete Variable zu sein, um eine Adaptationskurve hervorzurufen. In der ersten Episode der Adaptation war die lineare Distanz zwar verkürzt, doch bereits in der zweiten Episode wurden die Werte der Grundbedingung wieder erreicht. Dieses Ergebnis entspricht dem eines Experiments von Bock (1993), in dem Probanden mit unterschiedlichen Gewichten, die an der Hand befestigt wurden, Zeigebewegungen ausführen sollten. Die Anpassung an die

Gewichtsänderung erfolgte innerhalb der ersten Bewegung. Der Mensch scheint also sehr schnell an veränderte Gewichte und deren Auswirkungen zu adaptieren, da er täglich damit konfrontiert wird. Bei sich ändernden Gewichten von Flaschen oder Gläsern auf Grund von Inhalt sowie Material werden die Muskelspannung und die Bewegung innerhalb sehr kurzer Zeit an die Veränderungen angepasst. Die Ergebnisse zeigten somit keine Adaptationskurve, so dass die lineare Distanz nicht geeignet zu sein scheint, die Adaptation an den Stab zu beschreiben. Daher soll an dieser Stelle auf eine ausführlichere Diskussion der Ergebnisse verzichtet werden.

Die Maximalgeschwindigkeit schien zu Beginn des Experiments ebenfalls eine geeignete Variable zu sein, da durch die Rückstellkraft des Stabes hier eine Veränderung erwartet wurde. Mit Einsetzen der Störung stieg die Geschwindigkeit bei Gruppen, die den Stab benutzten, langsam an und entfernte sich somit von den Werten der Grundbedingung, während die Geschwindigkeit der Gruppe, die nur an die visuelle Störung adaptierte, gleich blieb. In der zweiten Adaptationsphase bewegte sich die Gruppe kompovis, die zum ersten Mal den Stab benutzte, sprunghaft mit einer höheren Geschwindigkeit, und nur die Gruppe kompomec unterschied sich durch höhere Werte von kompovis und dekovis. Hier scheint zwar eine Art Anpassung an den Stab stattgefunden zu haben, indem die Geschwindigkeit anstieg, doch es handelt sich nicht um eine typische Adaptationskurve. Dabei kommt es durch das Einschalten einer Störung zu einer abrupten Verschlechterung, die sich während der Adaptationsphase wieder normalisiert und den Werten der Grundbedingung annähert. Darüber hinaus ergaben sich keine einheitlichen Aussagen für die Entwicklung der Geschwindigkeit, da die Benutzung des Stabes bei den Gruppen kompomec, dekomec und decovis nach und nach zu schnelleren Geschwindigkeiten führte, bei der Gruppe kompovis jedoch einen abrupten Anstieg zur Folge hatte. Insgesamt gesehen scheint daher auch die Maximalgeschwindigkeit keine geeignete Variable zu sein, weshalb ebenfalls auf eine ausführlichere Diskussion verzichtet wird.

Da demnach nur die Darstellung des Fehlerwinkels eine Adaptationskurve ergab, wie sie aus früheren Studien bekannt ist, wurde diese Variable an Hand von drei Fragestellungen genauer untersucht: Erstens, lernten die Probanden die visuelle Störung besser oder schlechter wenn sie gleichzeitig an die mechanische Störung adaptierten? Zweitens, ist es leichter oder schwerer, die visuelle Störung zu erlernen, wenn

zuvor an die mechanische adaptiert wurde? Drittens, hat es einen Einfluss auf die Adaptationskurve, wenn die mechanische Störung zu der bereits gelernten visuellen Störung addiert oder von der gemeinsamen Adaptation weggelassen wird? Die erste Fragestellung wurde mit einer ANOVA der ersten Adaptationsphase der mit Rotation arbeitenden Gruppen beantwortet. Dabei zeigte sich nur ein Effekt des Faktors Episode ( $F_{6,21,93,19} = 60.18^{***}$ ) jedoch kein Unterschied zwischen den Gruppen. Um die zweite Fragestellung zu beantworten, wurde die zweite Adaptationsphase der Gruppe kompomec mit der ersten der Gruppe kompovis verglichen. Hierbei zeigte sich nur eine Signifikanz für den Faktor Episode ( $F_{29,290} = 26.37^{***}$ ), aber kein Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Für die Beantwortung der dritten Frage wurde die zweite Adaptationsphase der Gruppen kompovis und dekomec miteinander verglichen. Dabei bestätigte die ANOVA die Beobachtungen, indem sie nicht nur eine Signifikanz für den Faktor Episode ( $F_{29,290} = 9.32^{***}$ ), sondern auch für die Interaktion Gruppe x Episode ( $F_{29,290} = 3.54^{***}$ ) ergab, wobei die Werte der Gruppe kompovis denen am Ende des Vortages entsprachen und die der Gruppe dekomec höher waren. Insgesamt kann demnach gesagt werden, dass es keinen Einfluss auf den Zeigefehler hatte, ob gleichzeitig die mechanische Störung gelernt, oder ob vorher an die mechanische Störung adaptiert wurde. Auch ein Hinzunehmen der mechanischen Störung nach erfolgter Adaptation an die visuelle Störung hatte keine Auswirkungen. Fiel jedoch der Stab nach einer gemeinsamen Adaptation weg, führte das zu einem Anstieg des Fehlerwinkels. Der Stab erhöhte durch den Druck in der Hand die propriozeptive RM. Diese schien die Adaptation weder zu stören noch zu verbessern, doch ein Wegfall wirkte sich negativ aus. Dieses könnte bedeuten, dass die Probanden sich an die zusätzlichen propriozeptiven Signale unbewusst gewöhnt haben und den abrupten Wegfall nicht direkt kompensieren können. Diese Ergebnisse widersprachen somit denen einer Studie von Burke und Gibbs aus dem Jahr 1965, die herausfanden, dass die Verstärkung propriozeptiver Signale durch einen Druckhebel zu besseren Ergebnissen in der Folgebewegung führte.

Flanagan et al. (1999) untersuchten in ihrer Studie eine visuelle und eine mechanische Störung mit entgegengesetzter Wirkrichtung. Sie fanden einen Kompositions-vorteil von 88% und einen Dekompositions-vorteil von 39% (abgelesene Werte). Da sich in diesem Experiment ebenfalls beide Vorteile ergaben, wurde die angenommene modulare Struktur von Transformationsregeln somit bestätigt. Darüber hinaus konnte

die Aussage von Flanagan et al. (1999) erweitert werden, da sich die Störungen nicht nur in ihrer Natur (visuell und mechanisch) unterschieden, sondern auch in der Wirkrichtung unabhängig waren. In beiden Studien ergab sich ein größerer Vorteil für die Komposition als für die Dekomposition. Dieses weist darauf hin, dass das Zusammensetzen bereits gelernter Transformationsregeln effektiver ist als das Zerlegen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Zeigefehler die einzige untersuchte Variable darstellte, bei der es nach einer abrupten Änderung zu einer Adaptationskurve kam. Da diese Kurve jedoch nur auf Grund der visuellen Störriechtung entstand und nicht von der mechanischen Störung beeinflusst wurde, kann aus diesen Ergebnissen geschlossen werden, dass sich der Stab nicht als mechanische Störung eignet. Die Adaptation an den Stab war, wenn sie überhaupt zu erkennen war, in den ersten Bewegungen abgeschlossen. Daher wurde beschlossen, in dem zweiten Adaptationsexperiment mit Vibration nicht mit dieser Art der mechanischen Störung zu arbeiten, sondern einen bereits etablierten Roboterarm auszuleihen.

## 2.3 Experimente zur Kognition

In den beiden folgenden Experimenten sollte mit Hilfe der DA-Methode die Rolle der Kognition bei der sensomotorischen Adaptation untersucht werden. Dazu wurden ZA benutzt, die verschiedene Ressourcen beanspruchen.

### 2.3.1 Ressourcenbedarf bei einer Doppelaufgabe mit Folgebewegungen

Eversheim und Bock (2001) sowie Eversheim (2002) beschrieben verschiedene Experimente, in denen sie die DA-Methode angewandt haben. Sie benutzten dabei zwar verschiedene Störungen, doch die LA war immer eine Folgeaufgabe. Abeele und Bock (2003) fanden heraus, dass die Adaptation bei Folgebewegungen zum Teil durch Korrekturen auf Grund der visuellen Kontrolle entsteht, während sie bei ballistischen Zeigebewegungen mehr auf Rekalibrierung beruht. Es sollte daher untersucht werden, ob sich das Muster des Ressourcenbedarfs bei einer DA auch auf ZB übertragen lässt. Mit ZB war es jedoch nicht möglich, die gleichen ZA wie bei Eversheim und Bock (2001) zu benutzen, da zwei diskrete Bewegungen in verschiedene Richtungen und mit unterschiedlichen Rhythmen mit beiden Händen sehr schwer gleichzeitig auszuführen sind (Swinnen et al. 1991). Wie Eversheim (2002) annahm, ist schon bei kontinuierlichen FB ein Teil der Interferenz auf Konkurrenz um periphermotorische Mechanismen zurückzuführen, so dass diese bei der Benutzung von diskreten ZB noch verstärkt würde. Daher wurde in diesem Experiment zunächst sowohl die von Eversheim benutzte Bewegungsform (FB) als auch die gleiche Störung (oben-unten Transformation) verwendet, um neue RA zu erproben. Dafür wurde diese LA kombiniert mit verschiedenen, teilweise neuen RA: An Stelle der vorher benutzten vier manuellen RA wurden nur zwei der manuellen übernommen und zwei möglichst ähnliche verbale entwickelt, um deren Auswirkung auf die Folgeaufgabe miteinander vergleichen zu können.

### 2.3.1.1 Spezielle Methodik

#### *Lernaufgabe*

Die LA bestand in diesem Experiment somit aus den in der experimentübergreifenden Methodik beschriebenen FB mit einer oben-unten Transformation der visuellen RM. Diese Störung führte dazu, dass die Bewegungen an der Horizontalachse gespiegelt wurden und sich das Fadenkreuz auf dem Bildschirm nach oben bewegte, wenn die Hand nach unten geführt wurde und umgekehrt. Die Seitbewegung wurde nicht verändert, so dass eine Handbewegung nach rechts in einer Fadenkreuzbewegung nach rechts resultierte. Die Episoden in diesem Experiment waren 35 Sekunden lang und die Pausen zwischen den einzelnen Episoden betragen fünf Sekunden.

#### *Zweitaufrage*

Es wurden vier verschiedene RA als ZA benutzt, zwei manuelle und zwei verbale. Die in der allgemeinen Methodik beschriebene Kontrollaufgabe wurde nicht nur in der beschriebenen manuellen Form (manuelle KTR), sondern auch in der verbalen Variante durchgeführt (verbale KTR). Dabei musste anstatt eines Tastendrucks in die Richtung des Stimulus die jeweilige Richtung (oben, unten, rechts oder links) in das Mikrofon gesprochen werden. Bei dieser Aufgabe wurde somit nur die Antwortmodalität gegenüber der manuellen Antwort geändert. Da frühere Studien eine geringere Doppel­ tätigkeitsinterferenz bei verminderter Konkurrenz um peripher-motorische Systeme ergaben (Wickens 1980), ist es möglich, dass die Interferenz bei den verbalen Aufgaben am Ende der Adaptation auf Werte nahe denen der Grundbedingung sinkt. Die beiden weiteren RA waren bis auf die Modalität der Reaktion, manuell oder verbal, ebenfalls gleich. Hierbei erschienen wieder vier dünne Linien an den Bildschirmseiten. Erneut verbreiterte sich eine davon in zufälliger Reihenfolge als Stimulus zu einem Balken. Allerdings musste die Antwort bei diesen beiden Aufgaben nicht, wie in der Kontrollaufgabe, in die Stimulusrichtung erfolgen, sondern um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht (manuell 90° und verbal 90°). Leuchtete also der obere Balken auf, war die richtige Antwort ein Druck der linken Antworttaste bzw. das Wort „links“. Hierbei müssten neben den Ressourcen der Antwortauswahl besonders jene der visuell-räumlichen Verarbeitung beansprucht werden.

*Ablauf*

Am Übungstag absolvierten die Probanden 42 Episoden, die nicht ausgewertet wurden. Sie begannen mit fünf Blöcken, in denen nur die vier RA alleine immer in der gleichen Reihenfolge geübt wurden (5 Blöcke x 4 ZA → 20 Episoden). Anschließend folgte eine Episode, in der die FB alleine durchgeführt wurde, danach fünf Blöcke unter DA-Bedingungen (5 Blöcke x 4 DA → 20 Episoden). Als letzte Episode an diesem Übungstag führten die Probanden eine FB als EA durch. Am zweiten Tag begannen die Probanden zuerst mit einer Aufwärmepisode, die nicht ausgewertet wurde. Dabei erhielten alle Probanden die verbale KTR als DA, unabhängig von der jeweiligen späteren Reihenfolge der RA. Anschließend wurden eine EA mit FB, ein Block von DA und eine weitere EA-Folgeepisode mit wahrheitsgemäßer RM als Grundbedingungsdaten erhoben (Tab. 4). Danach folgten mit oben-unten vertauschter RM jeweils sechs EA-Folgeepisoden und vier DA Episoden. Von diesen Abschnitten von je zehn Episoden wurden sechs Wiederholungen durchgeführt.

Aufgabe	EA	DA	EA	EA	DA	EA	DA	EA	DA	EA	DA	EA	DA	EA	DA
visuelle RM	normal			oben-unten transformiert											
Episodenzahl	1	4	1	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4
Block		1			2		3		4		5		6		7
Abschnitt	1			2		3		4		5		6		7	

**Tab. 4: Ablauf des Experiments C am zweiten Tag**

Dargestellt sind nur die Episoden, die ausgewertet wurden.

*Auswertung*

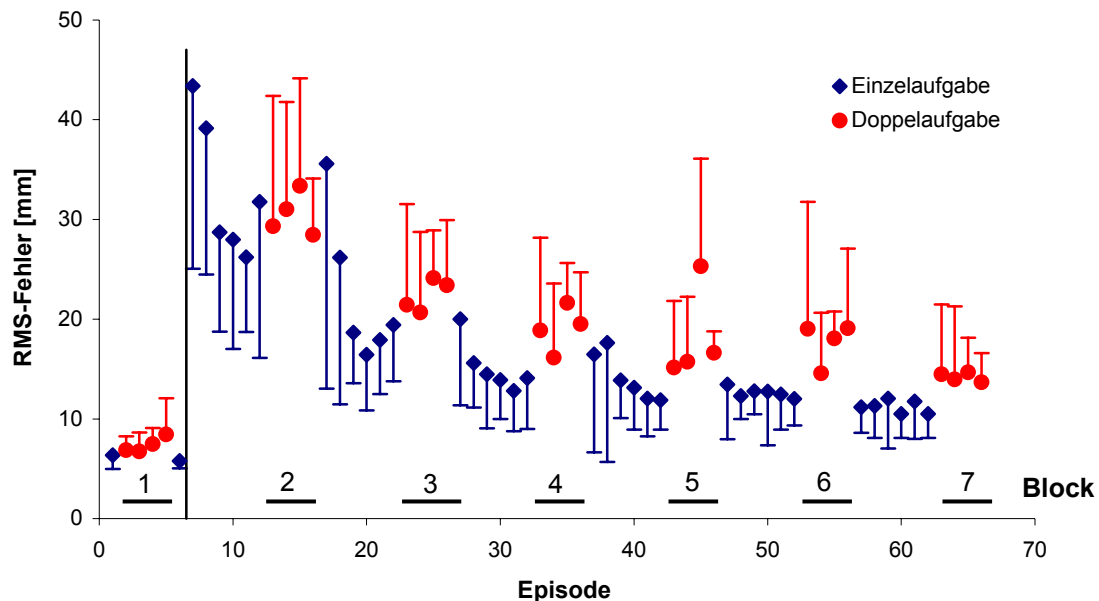
Die untersuchten Variablen waren der RMS-Fehler, der  $\Delta$ RMS-Fehler und die Reaktionszeit. Der RMS-Fehler wurde in einer einfaktoriellen ANOVA mit Messwiederholungen mit dem Faktor *Episode* untersucht. Der  $\Delta$ RMS-Fehler wurde, ebenso wie die Reaktionszeit, in einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholungen genauer betrachtet. Die Faktoren waren dabei *Blockanzahl* (6 oder 7) und Art der *RA* (manuell KTR, manuell 90°, verbal KTR, verbal 90°).



## 2.3.1.2 Ergebnisse

*Lernaufgabe*

Typische Rohdaten der Folgebewegung sind in der experimentübergreifenden Methodik in Abb. 3 dargestellt. Aus diesen Rohdaten wurde für jede Episode eines jeden Probanden der RMS-Fehler berechnet und als Adaptationskurve dargestellt. Abb. 16 zeigt die über alle Probanden gemittelte Fehlerkurve.

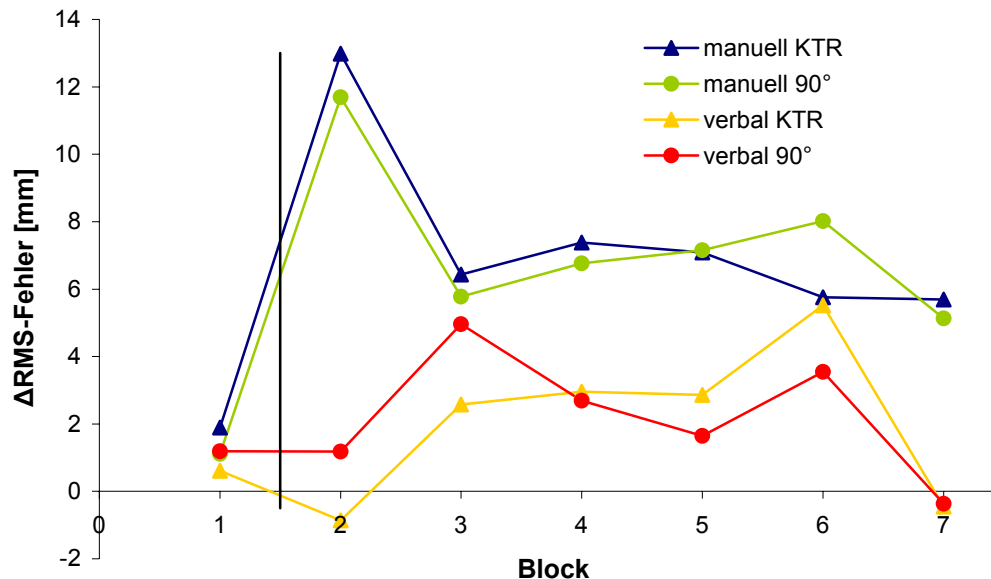


**Abb. 16: Zeitlicher Verlauf des Folgefehlers aller Probanden am zweiten Tag**

Die vertikale Linie indiziert den Beginn der oben-unten Transformation. Jedes Symbol stellt den Mittelwert der jeweiligen Episode über alle Probanden dar, die Standardabweichung ist durch die Balken gegeben. Zu beachten ist dabei, dass die DA hier nicht nach ihrer Art sortiert, sondern in ihrer zeitlichen Abfolge dargestellt sind. Jeder Kreis beinhaltet also zweimal jede Art der RA.

Mit normaler RM waren alle Probanden sowohl unter EA- als auch unter DA-Bedingungen in der Lage, dem Zielpunkt mit hoher Genauigkeit zu folgen, wie die ANOVA bestätigt, die keinen signifikanten Unterschied zwischen den ersten sechs Episoden ermittelte ( $F_{5,35} = 2.43^{n.s.}$ ). Zu Beginn der oben-unten Transformation der RM stieg der Folgefehler abrupt um das Sechsfache an und verbesserte sich kontinuierlich wieder. Diese Beobachtung wurde von der ANOVA bestätigt, die einen signifikanten Effekt für Episode sowohl für die EA ( $F_{35,245} = 10.08^{***}$ ) als auch für DA ( $F_{23,161} = 5.66^{***}$ ) ergab. Der Wert der Grundbedingung wurde nicht erreicht. Aus der Abbildung geht deutlich hervor, dass die Fehlerwerte der Episoden mit DA in dieser Adaptationsphase bis zum Ende höher waren als die der EA. Um die Differenz zwischen EA und DA als  $\Delta$ RMS-Fehler angeben zu können, musste zu jedem Zeitpunkt einer DA

ein imaginärer EA-Wert errechnet werden. Das hier verwendete Verfahren wurde in der experimentübergreifenden Methodik beschrieben. In Abb. 17 ist die über alle Probanden gemittelte  $\Delta$ RMS-Fehlerkurve dargestellt.



**Abb. 17: Verlauf der  $\Delta$ RMS-Fehler Experiment C**

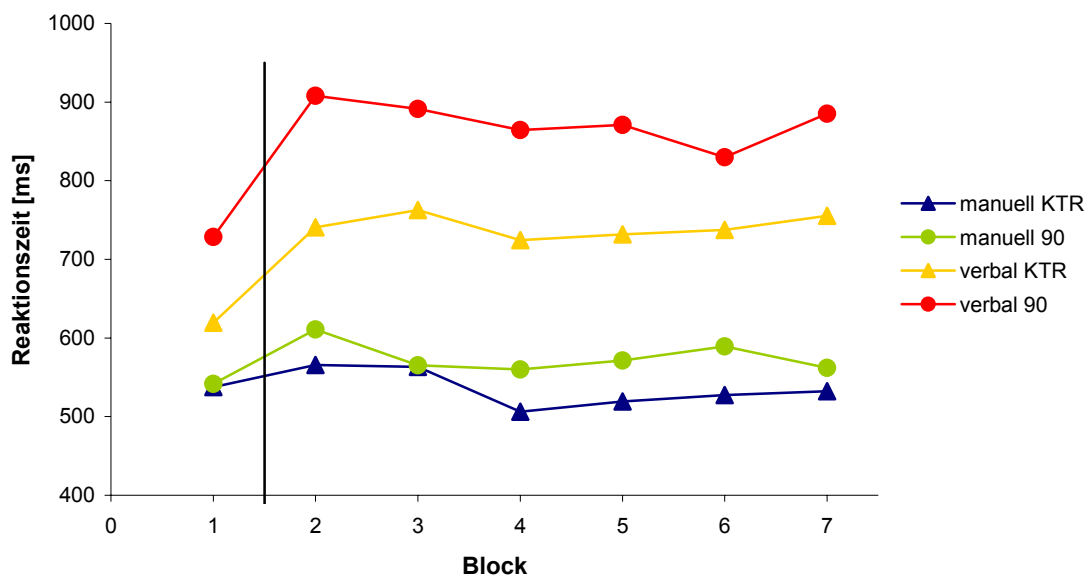
Jede Farbe stellt eine RA-Art dar, jedes Symbol den Mittelwert aller Probanden für diese Aufgabe innerhalb des jeweiligen Blocks. Die vertikale Linie indiziert den Beginn der Transformation. Standardabweichungen sind hier aus Gründen der Übersicht nicht abgebildet, sind aber im Anhang C tabellarisch aufgelistet.

Im ersten Block, also ohne Störung, waren die  $\Delta$ RMS-Fehler gering und unterschieden sich statistisch nicht zwischen den verschiedenen DA ( $F_{3,21} = 2.04^{n.s.}$ ). Mit Beginn der Störung stieg der  $\Delta$ RMS-Fehler der manuellen DA abrupt an, reduzierte sich im dritten Block wieder und blieb bis zum Ende des Experiments auf einem Niveau oberhalb des Wertes der Grundbedingung. Die  $\Delta$ RMS-Fehler der verbalen DA blieben gleich oder nahmen zunächst leicht ab, bevor sie wieder anstiegen, um in einem variablen und unruhigen Verlauf im letzten Block wieder auf Null zu fallen. Statistisch ergab eine zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren *Block* (7) und *RA* (manuell KTR, manuell 90°, verbal KTR, verbal 90°) keinen Unterschied zwischen den Blöcken ( $F_{6,42} = 1.17^{n.s.}$ ). Für den Faktor *RA* zeigte sich eine Signifikanz ( $F_{3,21} = 6.40^{**}$ ). Der Post hoc-Test ergab, dass sich nur die beiden manuellen signifikant von den beiden verbalen Aufgaben unterschieden (beide  $p < 0.01$ ), jedoch unterschieden sich die beiden Aufgaben der gleichen Modalität nicht voneinander ( $p > 0.05$ ). Die Interaktion von *Block* x *RA* war ebenfalls signifikant ( $F_{18,126} = 1.88^*$ ). Bei der getrennten Analyse der sechs Transformationsblöcke ergab sich erneut die Signifikanz des Faktors *RA*

( $F_{3,21} = 6.19^{**}$ ), wobei auch hier der Unterschied von den beiden manuellen zu den beiden verbalen Aufgaben signifikant war ( $p < 0.01$ ). Bei einer getrennten Analyse der verbalen und manuellen RA über alle sieben Blöcke fand die ANOVA für die manuellen nur einen signifikanten Unterschied für den Faktor Block ( $F_{6,42} = 3.14^*$ ). Der LSD Post hoc-Test zeigte, dass sich nur der erste Block signifikant von allen außer dem siebten unterschied ( $p < 0.001$ ,  $p < 0.05$ ) und der zweite zusätzlich vom siebten ( $p < 0.05$ ). Für die verbalen RA ergaben sich keinerlei Signifikanzen.

### Zweitauflage

Die in der ZA registrierten Reaktionszeiten stiegen mit Beginn der Störung für die verschiedenen RA unterschiedlich stark an (Abb. 18).



**Abb. 18: Verlauf der Reaktionszeiten der verschiedenen RA Experiment C**

Jede Farbe stellt eine RA-Art dar, jedes Symbol den Mittelwert aller Probanden dieser Aufgabe innerhalb des jeweiligen Blocks. Die vertikale Linie indiziert den Beginn der Transformation. Standardabweichungen sind hier aus Gründen der Übersicht nicht abgebildet, sind aber im Anhang C tabellarisch aufgelistet.

Die ANOVA ergab Signifikanzen für beide Faktoren und deren Interaktion. Für den Faktor Block ( $F_{6,42} = 4.19^{**}$ ) stellte sich im LSD Post hoc-Test heraus, dass dieser Unterschied nur vom ersten Block zu allen anderen bestand ( $p < 0.01$  und  $p < 0.001$ ). Für den Faktor RA ( $F_{3,21} = 31.52^{***}$ ) zeigte sich ein Unterschied von den beiden verbalen zu den beiden manuellen Aufgaben ( $p < 0.001$ ) und zwischen den beiden verbalen ( $p < 0.01$ ). Die Interaktion war ebenfalls signifikant ( $F_{18,126} = 1.95^*$ ). Über die sechs Blöcke der Transformation veränderten sich die Reaktionszeiten innerhalb der einzelnen RA kaum, wie die ANOVA bestätigte, die für den Faktor Block ( $F_{5,35} =$

1.57<sup>n.s.</sup>) keine Signifikanz ergab. Der fast parallele Verlauf der Kurven in der Adaptationsphase wurde ebenfalls von einer nicht signifikanten Interaktion Block x RA in der ANOVA bestätigt ( $F_{15,105} = 0.99^{\text{n.s.}}$ ). Die unterschiedlichen Höhen der einzelnen RA wurden in der ANOVA erneut durch den signifikanten Faktor RA ( $F_{3,21} = 30.89^{***}$ ) deutlich. Der Post hoc-Test zeigte auch über diese sechs Blöcke erneut einen Unterschied zwischen den verbalen und den manuellen Aufgaben ( $p < 0.001$ ) und zusätzlich zwischen den beiden verbalen ( $p < 0.01$ ).

### 2.3.1.3 Diskussion

In diesem Experiment wurden die Ressourcen-Anforderungen während der Adaptation an eine oben-unten Transformation der visuellen RM bei Benutzung einer Folgeaufgabe untersucht. Die Bewegungsgenauigkeit war in der Grundbedingung für EA und DA nahezu identisch. Diese Ergebnisse stimmen mit Studien überein, die zeigen, dass DA ohne Interferenzen ausgeführt werden können (Hazeltine et al. 2002). Mit Beginn der Störung nahm der RMS-Fehler abrupt zu, bevor er mit zunehmender Übung langsam wieder abnahm. Auf einen Retentionstest konnte in diesem Experiment verzichtet werden, da er von Bock et al. (2001) in einer Studie mit der gleichen Störung durchgeführt wurde und gezeigt werden konnte, dass bei dieser Art von LA Adaptation stattfindet. Die Zunahme der RMS-Fehler durch die oben-unten Transformation war unter DA-Bedingungen größer als unter EA-Bedingungen. Da es in der Grundbedingung keine Unterschiede zwischen EA und DA gab, kann dieser Anstieg auf die zusätzlich benötigten Ressourcen während des Lernprozesses an die oben-unten Umkehr zurückgeführt werden. Unabhängig davon, ob eine ZA hinzukam, wurde die Folgeleistung der Probanden mit zunehmender Übung besser. Diese Verbesserung entspricht ungefähr derjenigen, die Probanden in früheren Einzel-Folgeaufgaben erreichten. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die ZA sich zwar in einem höheren Fehlerwert zeigt, nicht aber das Lernen beeinflusst.

Bei der Betrachtung der  $\Delta$ RMS-Fehler zeigten sich während der Adaptationsphase höhere Werte für die DA mit den beiden manuellen RA. Darüber hinaus wurde deutlich, dass der Anstieg der Werte mit Beginn der Transformation ebenfalls nur bei den manuellen DA auftrat. Daraus könnte geschlossen werden, dass die Kombination der manuellen LA mit der manuellen RA ressourcenfordernder ist als die mit verbalen RA.

Für die Werte der Reaktionszeit ergab sich ein entgegengesetztes Bild. Dort waren generell die Werte der beiden verbalen RA höher als die der manuellen. Weiterhin war nur der Anstieg der verbalen Reaktionszeiten mit Beginn der Transformation signifikant und es zeigte sich ein Unterschied zwischen den beiden verbalen Aufgaben. Da auch in der Grundbedingung die verbalen Reaktionszeiten höher waren, scheint entweder deren Verarbeitung mehr Zeit zu benötigen oder der Unterschied entstand auf Grund verschiedener Aufzeichnungsgeräte. Die genaue Ursache kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Außerdem deuten die Werte auf eine längere Verarbeitungszeit verbaler Aufgaben mit visuell-räumlichem Anspruch hin, die sich bei den manuellen nicht zeigte.

Eine gemeinsame Betrachtung der  $\Delta$ RMS-Fehler und der Reaktionszeiten weist demnach darauf hin, dass der Ressourcenbedarf zu Beginn des Lernprozesses höher ist und anschließend wieder abnimmt, wie es auch Schneider und Shiffrin (1977) in Bezug auf die kontrollierte und die automatische Verarbeitung berichteten. Sie beschrieben das Lernen zunächst als kontrollierten Ablauf, der durch langsame Verarbeitung gekennzeichnet ist und durch vorhandene Ressourcen bestimmt wird. Mit zunehmendem Lernen ändert sich der Verlauf zu einer automatischen Verarbeitung hin, die schneller und weniger aufmerksamkeitsfordernd ist. Letztere scheint in dem vorliegenden Experiment bereits nach dem ersten Block erreicht zu sein, da sich danach kaum noch Änderungen in den beiden Variablen ergaben.

Lintern und Wickens (1991) sagten aus, dass Ressourcen für das Lernen benötigt werden, und dass sich dieser Ressourcenbedarf möglicherweise während eines Lernprozesses ändert. Während auch bei Eversheim und Bock (2001) spezifische Muster für die unterschiedlichen RA auftraten, ergab dieses Experiment keine Hinweise darauf. Auffällig in der  $\Delta$ RMS-Fehlerkurve war vielmehr, dass die Werte nach Transformationsbeginn nur für die beiden manuellen Aufgaben anstiegen. Da sich bei den verbalen Aufgaben dieser Anstieg in den Reaktionszeiten ergab, kann daraus geschlossen werden, dass der Ressourcenbedarf zu Beginn der Adaptationsphase erhöht war. Die Aufmerksamkeitsverschiebung hin zu der Lernaufgabe könnte den untypischen Verlauf der  $\Delta$ RMS-Fehlerkurve bei den verbalen DA erklären. Da die  $\Delta$ RMS-Fehler der manuellen Aufgaben jedoch um das Sechsfache anstiegen und die der verbalen Aufgaben gar nicht, ist es wahrscheinlich, dass dieser Unterschied nicht

nur durch die Verlagerung der Priorität zu erklären ist. Er kann allerdings auch nicht auf eine generelle Konkurrenz peripher-motorischer Systeme zurückgeführt werden, da sich in der Grundbedingung noch kein Unterschied ergab, obwohl die Ein- und Ausgangsmodalitäten der Aufgaben nicht verändert worden waren. Die Ergebnisse deuten daher darauf hin, dass diese strukturelle Interferenz erst bei einem erhöhten Ressourcenbedarf entsteht und sich daher erst während der erschwerten Folgeaufgabe zeigte. Eine solche Konkurrenz trat bereits bei Eversheim (2002) auf. Die Aufgabe mit der visuell-räumlichen Drehung führte in diesem Experiment nicht zu signifikant höheren  $\Delta$ RMS-Fehlern als die einfache Kontrollaufgabe, so dass die zentral-kognitive Konkurrenz, über die Eversheim und Bock (2001) berichteten, bei den manuellen DA nicht auftrat.

Das Fehlen eines spezifischen Musters der Ressourcenverteilung im Gegensatz zu Eversheim und Bock (2001) könnte verschiedene Ursachen haben: Sowohl die Datenaufzeichnung als auch die Auswertung wurden mit neuen Programmen durchgeführt. Da allerdings auf die Gleichheit der Programme geachtet wurde und der RMS-Fehler für jede Episode automatisch, also ohne Einfluss des Auswertenden errechnet wurde, erscheint diese Begründung nicht ausreichend. Ein weiterer möglicher Grund könnten die während des Experiments gegebenen Anweisungen sein. Je nach den Anweisungen des Versuchsleiters kann sich das Verhalten der Probanden ändern, z. B. durch Motivation oder die Verteilung der Aufmerksamkeit auf die beiden Aufgaben. Diese Begründung scheint wahrscheinlicher als die der Programmunterschiede. Das Ressourcenmuster von Eversheim und Bock (2001) konnte zwar nicht repliziert werden, doch zeigte sich ebenso wie bei Eversheim (2002) ein geringerer  $\Delta$ RMS-Fehler für die DA mit verbalen RA als für die mit manuellen.

Auch wenn in diesem Experiment die Ergebnisse von Eversheim und Bock (2001) nicht reproduziert werden konnten, sollten im nächsten Experiment dennoch ZB als LA benutzt werden. Da die Adaptation sich bei FB und ZB unterscheidet (Abeebe und Bock 2003), ist es möglich, dass es auch im Ressourcenbedarf Unterschiede gibt. Daher ist die Möglichkeit gegeben, mit ZB bei verbalen RA größere Effekte zu bekommen als in diesem Experiment, und eventuell einen sich im Zeitverlauf ändernden Ressourcenbedarf zu finden.

### 2.3.2 Ressourcenbedarf bei einer Doppelaufgabe mit Zeigebewegungen

Um zu untersuchen, ob sich der Ressourcenbedarf bei FB und ZB unterscheidet und ob sich mit ZB ein vergleichbares Muster des Ressourcenbedarfs ergibt wie bei Eversheim und Bock (2001), war die LA in diesem Experiment im Gegensatz zu dem vorherigen Experiment eine Zeigeaufgabe.

#### 2.3.2.1 Spezielle Methodik

##### *Lernaufgabe*

Die LA bestand in diesem Experiment aus den in der experimentübergreifenden Methodik beschriebenen ZB. Da eine oben-unten Transformation für diese Art der Bewegung nicht sinnvoll erschien, wurde nach der Grundbedingung als Störung eine visuelle  $+60^\circ$ -Rotation eingeführt. Dadurch wurde keine Änderung des Musters erwartet, da Eversheim (2002) herausfand, dass das gleiche DA-Muster bei verschiedenen Transformationen auftrat. Eine solche  $+60^\circ$ -Rotation bedeutete, dass sich das Fadenkreuz auf dem Bildschirm nach schräg links oben bewegt, wenn sich die Hand nach oben bewegt. Die Zielpunkte waren jeweils 12 cm vom Mittelpunkt entfernt. Da die Verbesserungen innerhalb der ersten Episoden des letzten Experiments sehr groß waren, wurde in diesem Experiment die Länge einer Episode auf 16.5 Sekunden verkürzt. Dafür wurde die Anzahl der Episoden erhöht, um die gleiche Übungszeit zu erreichen. Die Pausen zwischen den Episoden betragen fünf Sekunden.

##### *Zweitaufrage*

Es wurden fünf verschiedene RA benutzt: eine manuelle und vier verbale. Die Kontrollaufgabe war die in der experimentübergreifenden Methodik beschriebene Aufgabe in der verbalen Variante, also mit den verbalen Antworten oben, unten, rechts und links (verbal KTR). Darüber hinaus wurden drei verbale Aufgaben benutzt, bei denen je ein Aspekt im Vergleich zur verbal KTR verändert wurde, und eine manuelle Aufgabe. Hierbei wurde erneut versucht, die verbalen Aufgaben den manuellen von Eversheim und Bock (2001) so ähnlich wie möglich zu gestalten.

Wie im vorherigen Experiment beschrieben, erschienen bei der zweiten verbalen Aufgabe ebenfalls vier dünne Linien, von denen eine verbreitert wurde. Die richtige Antwort war eine 90°-Drehung der Richtung gegen den Uhrzeigersinn (verbal 90°). Leuchtete also die obere Linie auf, war die richtige Antwort das Wort „links“. Hierbei müssten neben den Ressourcen der Antwortauswahl besonders jene der visuell-räumlichen Verarbeitung beansprucht werden. Die dritte verbale Antwort erfolgte ebenfalls auf das Aufleuchten einer der vier Linien. Unabhängig von der Position des Aufleuchtens mussten die Probanden einfach nur „jetzt“ sagen (verbal leicht). Diese Aufgabe war eine Abwandlung der von Eversheim beschriebenen erhöhten Bewegungsplanung und -durchführung durch einen kurz-lang-kurz Rhythmus beim Tastendruck (Henry und Rogers 1960), die verbal nicht nachzuahmen war. Der Ressourcenbedarf dieser Aufgabe in Bezug auf die Antwortwahl sollte im Vergleich zu den anderen Aufgaben geringer sein, da kognitive Entscheidungsprozesse nicht nötig waren. Die Reaktionszeit müsste auf Grund verringerter Antwortalternativen (Hick 1952) und somit verkürzter Entscheidungsprozesse für eine adäquate Antwort reduziert sein (Goodman und Kelso 1980). Bei der letzten verbalen Aufgabe wurde nur eine dünne graue Linie gezeigt, die sich an der Stelle, an der sie erschien, verbreiterte (verbal Vorabinfo). Dadurch wussten die Probanden bereits frühzeitig wo der Stimulus erscheinen würde, jedoch nicht wann, und sie durften erst auf die Verbreiterung mit der Richtungsennung reagieren. Solche Vorabinformationen, „precue“ genannt, reduzieren die Reaktionszeit durch erhöhte Aufmerksamkeitsfokussierung auf den Bereich, in dem der Stimulus erwartet wird (Posner 1980; Murphy und Eriksen 1987; Eversheim und Bock 2001). Demnach sollten hierbei neben der Antwortwahl besonders Ressourcen der räumlichen Aufmerksamkeit beansprucht werden, während die Ressourcen für die Antwortwahl weniger benötigt werden müssten. Die manuelle RA dieses Experiments bestand in der manuellen Variante der vereinfachten verbalen „jetzt“-Antwort: Unabhängig davon, an welcher Stelle der Stimulus erschien, musste die einzige vorhandene Antworttaste (unten) gedrückt werden (manuell leicht). Auf Grund der Aussagen in der Literatur (Klapp et al. 1987) wurde bei dieser Aufgabe ein erhöhter Wettkampf um die Mechanismen der motorischen Ausgangsmodalität erwartet. Die abhängige Variable war bei all diesen RA erneut die verbale oder manuelle Reaktionszeit, die mit Hilfe des Mikrophons oder der Antworttaste aufgezeichnet wurde.



*Ablauf*

Am Übungstag absolvierten die Probanden 92 Episoden, wobei die Übungszeit auf Grund der kürzeren Episodenzeiten insgesamt ungefähr der von Experiment C entsprach. Diese Episoden wurden nicht ausgewertet. Die Probanden begannen dabei mit acht Blöcken, in denen nur die fünf RA alleine geübt wurden, wobei sie immer in der gleichen Reihenfolge erschienen (8 Blöcke x 5 ZA → 40 Episoden). Anschließend folgte eine Episode, in der das Zeigen alleine geübt wurde, bevor zehn Blöcke unter DA-Bedingungen durchgeführt wurden (10 Blöcke x 5 DA → 50 Episoden). Bevor der erste Testtag beendet wurde, führten die Probanden noch eine Episode der Einzel-Zeigaufgabe durch. Am zweiten Tag begannen alle Probanden mit einer Aufwärmepisode, wobei alle die verbale Kontrollaufgabe als DA erhielten, unabhängig von der jeweiligen späteren Reihenfolge der RA. Diese Episode wurde nicht ausgewertet. Anschließend wurden Blöcke mit je zehn Episoden durchgeführt, in denen jeweils fünf DA und fünf Zeige-EA abwechselnd gegeben wurden: EA-DA<sub>1</sub>-EA-DA<sub>2</sub>-EA-DA<sub>3</sub>-EA-DA<sub>4</sub>- EA-DA<sub>5</sub> (Tab. 5). Die Reihenfolge der DA blieb dabei für alle Probanden immer gleich und war ausgeglichen, so dass jede RA zu jedem Zeitpunkt des Experiments gleich häufig vorkam. Um Grundbedingungsdatendaten zu erheben, wurde der erste Block mit wahrheitsgemäßer RM der Handposition durchgeführt. Mit gedrehter RM folgten danach zehn Blöcke mit jeweils fünf EA- und fünf DA-Episoden.

Aufgabe	EA	DA <sub>1</sub>	EA	DA <sub>2</sub>	EA	DA <sub>3</sub>	EA	DA <sub>4</sub>	EA	DA <sub>5</sub>	visuelle RM	Block
Episode	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	normal	1
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	gedreht	2
	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		3
	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41		4
	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51		5
	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61		6
	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		7
	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81		8
	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91		9
	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101		10
	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111		11

**Tab. 5: Ablauf des Experiment D am zweiten Tag**

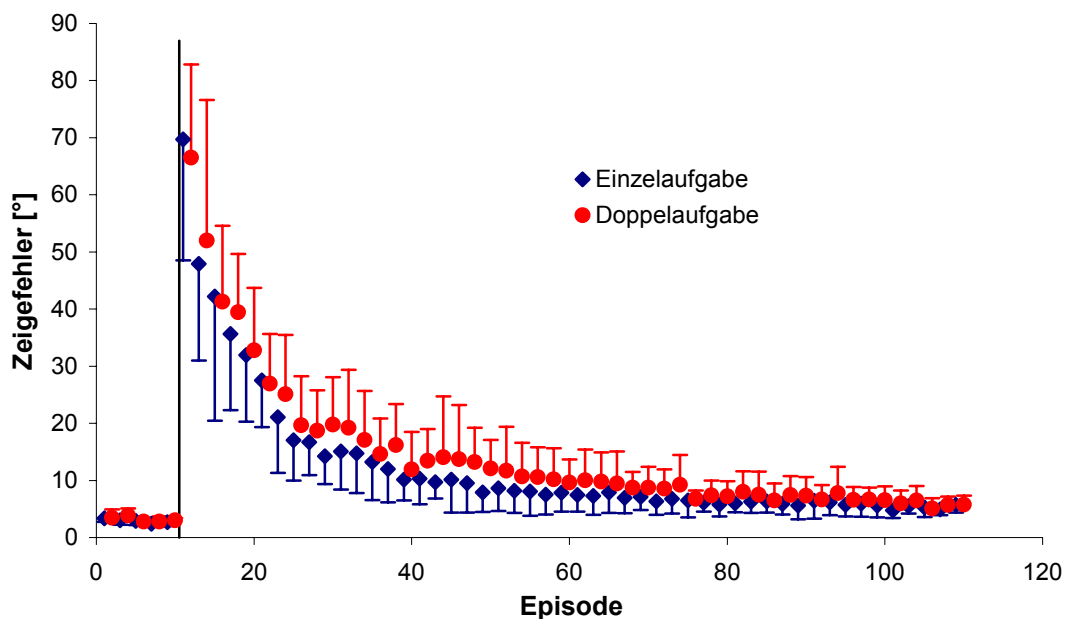
Dargestellt sind nur die Episoden, die ausgewertet wurden. DA<sub>1-5</sub> steht für eine DA mit einer der fünf verschiedenen RA.

### Auswertung

Die untersuchten Variablen waren der Zeigefehler, der  $\Delta$ Zeigefehler und die Reaktionszeit. Der Zeigefehler wurde in einer einfaktoriellen ANOVA mit Messwiederholungen mit dem Faktor *Episode* untersucht. Der  $\Delta$ Zeigefehler und die Reaktionszeit wurden jeweils in einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholungen genauer betrachtet. Die Faktoren waren dabei *Blockanzahl* (6 oder 7) und *RA* (verbal KTR, verbal Vorabinfo, verbal leicht, verbal 90°, manuell leicht).

#### 2.3.2.2 Ergebnisse

Die Abb. 4 in der experimentübergreifenden Methodik zeigt Originalbewegungen zu drei der acht Ziele. Aus diesen Rohdaten wurde für jede Episode eines jeden Probanden der Zeigefehler berechnet und als Adaptationskurve dargestellt. Abb. 19 zeigt die über alle Probanden gemittelte Fehlerkurve.



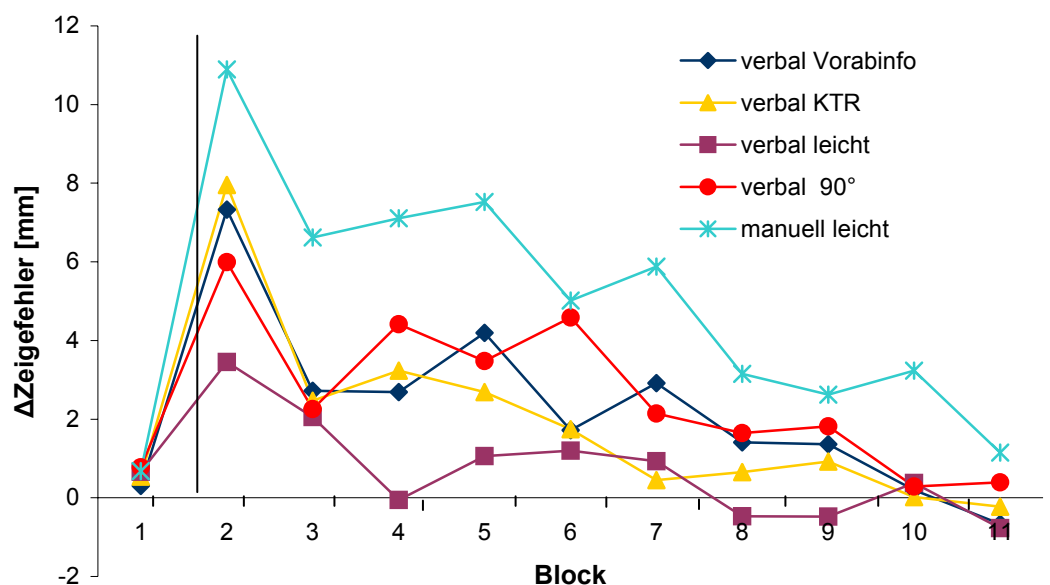
**Abb. 19: Zeitlicher Verlauf des Zeigefehlers am zweiten Tag Experiment D**

Die vertikale Linie indiziert den Beginn der 60°-Rotation. Jedes Symbol gibt den Mittelwert der jeweiligen Episode über alle Probanden wieder. Zu beachten ist dabei, dass die DA hier nicht sortiert, sondern in ihrer zeitlichen Abfolge dargestellt sind, jeder Kreis also zweimal jede Art der RA enthält.

In der Grundbedingung konnten alle Probanden genau in Richtung der Ziele zeigen, sowohl unter EA- als auch unter DA-Bedingungen. Diese Beobachtung wurde von der Varianzanalyse bestätigt, da keine Unterschiede in den ersten zehn Episoden auftraten ( $F_{6,05,54,5} = 3,00^{n.s.}$ ). Zu Beginn der Rotation stieg der Zeigefehler abrupt an und

näherte sich im Verlauf dieser Adaptationsphase langsam wieder dem Wert der Grundbedingung, ohne diesen vollständig zu erreichen. Während dieser Phase waren die Werte der DA-Episoden zu Beginn höher als die der EA-Episoden, unterschieden sich am Ende dieser Phase jedoch nicht mehr, wobei in der Varianzanalyse nur die Faktoren Episode ( $F_{49,414} = 66.41^{***}$ ) und Bedingung ( $F_{1,9} = 11.74^{**}$ ) Signifikanzen aufwiesen, jedoch nicht deren Interaktion.

Die Zunahme der Zeigefehler auf Grund der DA wurde für jeden Probanden mit Hilfe einer Anpassungsfunktion (Abb. 6) berechnet und als  $\Delta$ Zeigefehler im Experimentverlauf abgebildet. Die Mittelwertkurve ist in Abb. 20 dargestellt.

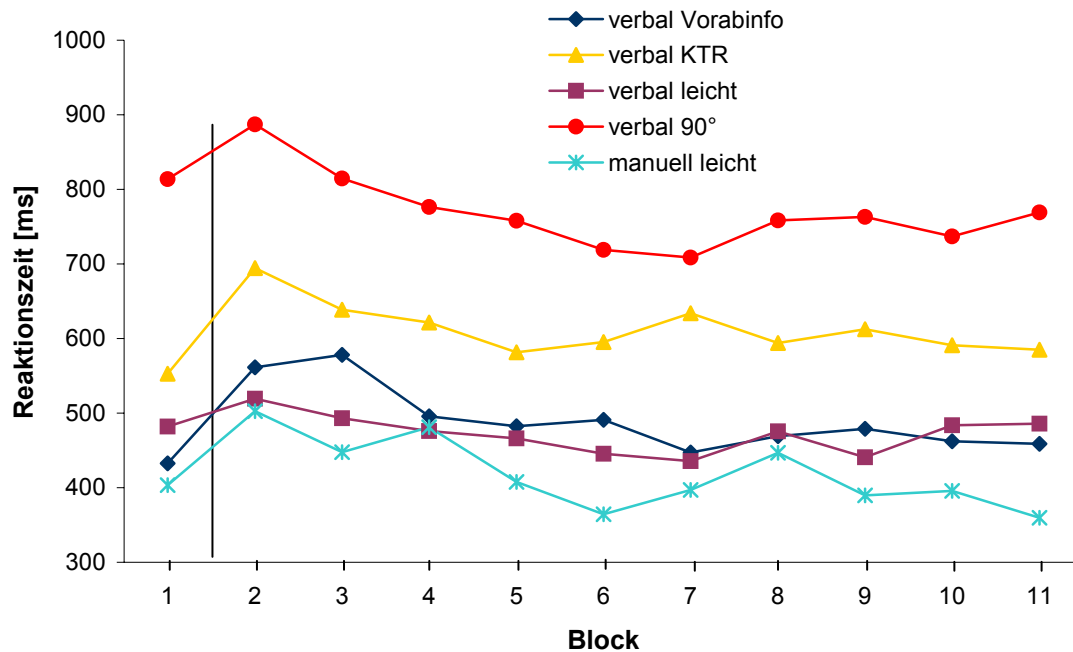


**Abb. 20: Verlauf der  $\Delta$ Zeigefehler Experiment D**

Jede Farbe stellt eine RA-Art dar, jedes Symbol den Mittelwert aller Probanden für diese Aufgabe innerhalb des jeweiligen Blocks. Die vertikale Linie deutet den Beginn der Transformation an. Standardabweichungen sind hier aus Gründen der Übersicht nicht abgebildet, sind aber im Anhang D tabellarisch aufgelistet.

Während der Grundbedingung war der  $\Delta$ Zeigefehler sehr niedrig und unterschied sich nicht zwischen den einzelnen RA. Mit Beginn der Adaptationsphase stieg die Interferenz für alle DA deutlich an und reduzierte sich mit zunehmender Übung. Das Ausmaß des Anstiegs und der Abnahme waren abhängig von der Art der RA. Diese Beobachtung wurde von einer Block x Aufgabe ANOVA mit Messwiederholungen der Blöcke 2-11 unterstützt. Sie ergab einen signifikanten Effekt für Block ( $F_{9,81} = 6.28^{***}$ ) und Aufgabe ( $F_{4,36} = 14.92^{***}$ ). Der LSD Post Hoc-Test zeigte, dass die Aufgaben mit nur einer Antwortmöglichkeit sich signifikant von sich selber und den anderen Aufga-

bentypen unterschieden (verbal leicht  $p < 0.05$ , manuell leicht  $p < 0.01$ ). Die drei verbalen Aufgaben unterschieden sich nicht signifikant voneinander ( $p > 0.05$ ). Die Interaktion Block x Aufgabe war nicht signifikant ( $F_{36,324} = 0.85^{n.s.}$ ).



**Abb. 21: Verlauf der Reaktionszeiten der verschiedenen RA Experiment D**

Jede Farbe stellt eine RA-Art dar, jedes Symbol den Mittelwert aller Probanden dieser Aufgabe innerhalb des jeweiligen Blocks. Die vertikale Linie zeigt den Beginn der Transformation. Standardabweichungen sind hier aus Gründen der Übersicht nicht abgebildet, sind aber im Anhang D tabellarisch aufgelistet.

Die Reaktionszeiten der ZA sind in Abb. 21 dargestellt. Es wird deutlich, dass sich die einzelnen Aufgaben in der Höhe der Reaktionszeit unterschieden, ansonsten aber einen ähnlichen Zeitverlauf aufwiesen. Diese Beobachtung wurde von der ANOVA bestätigt, die einen signifikanten Effekt von Block ( $F_{10,90} = 3.57^{***}$ ) und Aufgabe ( $F_{4,36} = 39.49^{***}$ ) ergab, jedoch keine signifikante Interaktion ( $F_{40,360} = 0.64^{n.s.}$ ). Der Post hoc-Test des Faktors Block ergab, dass sich nur der zweite und der dritte Block signifikant von den anderen unterschieden ( $p < 0.001$ ,  $p < 0.01$ ). Innerhalb der Aufgaben unterschied sich nur verbal leicht nicht signifikant von verbal Vorabinfo und manuell leicht (manuell leicht von verbal Vorabinfo:  $p < 0.05$ , alle anderen:  $p < 0.001$ ).

### 2.3.2.3 Diskussion

In diesem Experiment wurden die Ressourcenanforderungen in Folge einer +60°-Rotation der visuellen RM bei ZB untersucht. In der Grundbedingung waren die Zeigefehler sowohl bei EA als auch bei DA sehr gering und unterschieden sich nicht voneinander. Mit Beginn der Störung verschlechterte sich die Zeigegenauigkeit abrupt und wurde im Verlauf der Adaptationsphase wieder besser. Für DA war diese Verschlechterung zunächst größer, sie näherte sich aber mit zunehmender Experimentdauer den EA-Werten an. Dieses Ergebnis ist somit erneut ein Hinweis auf einen vermehrten Ressourcenbedarf zu Beginn der Adaptationsphase, der in deren Verlauf geringer wird.

Die nicht signifikante Interaktion der Faktoren Block und Aufgabe für die  $\Delta$ Zeigefehler verdeutlicht, dass sich auch in diesem Experiment kein spezifisches Muster des Ressourcenbedarfs im Zeitverlauf für die verschiedenen RA ergab: Zu Beginn wurden nicht, wie bei Eversheim und Bock (2001), vermehrt Ressourcen der Aufmerksamkeit benötigt (d.h., verbal Vorabinfo unterschied sich nicht von verbal KTR), und anschließend wurden auch nicht Ressourcen der visuell-räumlichen Verarbeitung mehr benötigt (d.h., verbal 90° unterschied sich nicht von verbal KTR). Daher konnte, wie im vorherigen Experiment, nicht bestätigt werden, dass die Aneignung neuer Fertigkeiten eine universell gültige Phasen- oder Stadienstruktur besitzt. Es wurde allerdings erneut deutlich, dass während der Adaptationsphase höhere  $\Delta$ Zeigefehler für die manuelle Aufgabe auftreten. Dieser Unterschied, der auch bei Eversheim (2002) gezeigt wurde, wies erneut darauf hin, dass nicht nur zentrale sondern auch periphere Mechanismen eine Rolle spielten. Damos (1985) beschrieb, dass die DA-Interferenz höher ist, je ähnlicher sich die Ausgangsmodalitäten der gleichzeitig ausgeführten Aufgaben sind. In diesem Experiment waren in der Grundbedingung die  $\Delta$ Zeigefehler der manuellen und der verbalen RA allerdings gleich. Daher kann eine generelle gegenseitige Störung bei ähnlichen Ausgangsmodalitäten (Klapp et al. 1987; Swinnen und Walter 1991) ausgeschlossen werden. Da der höhere Anstieg des  $\Delta$ Zeigefehlers bei der manuellen Aufgabe erst unter Adaptationsbedingungen deutlich wurde, scheint durch den Beginn der Störung der Kampf um die Ausgangsmodalität verstärkt zu werden.

Die drei verbalen Aufgaben, die mehr als eine Antwortmöglichkeit besaßen, wiesen höhere Inkremente auf als die einfache verbale Antwort. Daher lassen die Ergebnisse dieses Experiments darauf schließen, dass Ressourcen, die für die Vorbereitung einer Antwort benötigt werden, während der Adaptationsphase gefordert sind, sich an deren Ende aber nicht mehr von den anderen unterscheiden.

Entgegen der Ergebnisse von Eversheim und Bock (2001) sowie denen von Ruthruff et al. (2005) fielen die  $\Delta$ Zeigefehler in diesem Experiment im letzten Block auf Werte nahe Null ab. In dem vorherigen Experiment ergaben sich für die verbalen RA am Ende der Adaptationsphase ebenfalls Werte nahe der Nulllinie, jedoch nicht für die manuellen RA, welche in diesem Experiment den Wert der Grundbedingung erreichte. Es kann demnach angenommen werden, dass die Benutzung der gleichen Ausgangsmodalitäten bei einer kontinuierlichen Lernaufgabe größere Interferenzen zur Folge hat. Ruthruff et al. (2003) fanden heraus, dass die Probanden in ihrer DA-Studie dazu tendierten, die Antworten entweder zusammen zu gruppieren oder auf eine weit vor der anderen zu antworten. Diese Möglichkeit wäre in diesem Experiment durch zwei diskrete Bewegungen zwar gegeben, konnte in einer Analyse der Daten aber nicht bestätigt werden. Es ist jedoch auch möglich, dass dieser Unterschied auf Grund der Art der manuellen Aufgabe entstand, die in diesem Experiment keine Richtungsentscheidung erforderte, und nicht auf Grund der verschiedenen LA.

Bei den Reaktionszeiten zeigten sich erneut bereits in der Grundbedingung höhere Werte von verbal 90° und verbal KTR gegenüber der manuellen und auch gegenüber verbal Vorabinfo und verbal leicht. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass sich dieser Unterschied in Experiment C und in diesem Experiment nicht auf Grund der unterschiedlichen Aufzeichnungsgeräte ergab, sondern dass die höhere Anzahl von Antwortmöglichkeiten und die kognitive Drehung Zeit benötigen. Außerdem ergab sich in diesem Experiment keine unterschiedliche Zunahme der Reaktionszeiten zwischen der manuellen und den verbalen Aufgaben, so dass davon ausgegangen werden kann, dass es nicht zu einer strategischen Verschiebung der Aufmerksamkeit kam.

Zusammenfassend kann somit gesagt werden, dass die Annahme, dass es in einem Lernprozess Phasen mit unterschiedlichem Ressourcenanspruch gibt, von den Ergebnissen nicht unterstützt wird. Dies würde aber bedeuten, dass die universelle Gül-

tigkeit der Entwicklungsphasen und -stufen des motorischen Lernens in Frage gestellt würde (Fitts 1964). Da in beiden Studien zur Kognition kein sich änderndes Muster des Ressourcenbedarfs gefunden wurde, kann an dieser Stelle keine Aussage darüber getroffen werden, ob es bzgl. des Ressourcenbedarfs einen Unterschied zwischen den verschiedenen Bewegungsarten gibt.

## 2.4 Experimente zur Propriozeption

Die folgenden drei Experimente sollten die Auswirkungen von Vibration auf die propriozeptive RM untersuchen. Das erste Experiment war dabei ein Kontrollexperiment für die Wirkung der Vibration, das zweite und das dritte Experiment untersuchten die Rolle der Propriozeption bei der sensomotorischen Adaptation.

### 2.4.1 Auswirkung von Vibration auf die propriozeptive Rückmeldung

Der Ablauf dieses Experiments unterschied sich von allen anderen dieser Arbeit. Es sollte dazu dienen, zu untersuchen, ob der Vibrationsaufbau, der für die beiden letzten Experimente dieser Arbeit genutzt werden sollte, die Propriozeption wie erwartet stört. Es ist bekannt, dass die Vibration einer Sehne zu einer Bewegung oder, bei immobilisiertem Arm, zu der Illusion einer Bewegung in die antagonistische Richtung der vibrierten Muskeln führt (Goodwin et al. 1972). Darüber hinaus ist bekannt, dass Vibration die Antwort auf physiologische Stimuli verschleiert und die Muskelspindeln somit weniger sensibel für gleichzeitige Stimuli macht (Roll et al. 1989). Werden antagonistische Muskeln einer Extremität gleichzeitig mit derselben Frequenz vibriert, so heben sich die Bewegungen und deren Illusionen gegenseitig auf (Gilhodes et al. 1986), die verringerte Sensibilität gegenüber weiteren Stimuli bleibt allerdings erhalten (Vuillerme et al. 2002). Diese Eigenschaften sollten in den Adaptationsexperimenten genutzt werden. Um die Auswirkungen der geplanten bilateralen Vibration auf die Propriozeption in verschiedenen Situationen zu untersuchen, wurden drei Tests durchgeführt, wobei jeder von jedem Probanden einmal mit (VIB) und einmal ohne Vibration (KTR) absolviert wurde. Die acht Probanden im Alter von 24 bis 35 Jahren wurden randomisiert in zwei Gruppen eingeteilt, wobei die eine den jeweiligen Test erst ohne und dann mit Vibration ausführte, die andere in umgekehrter Reihenfolge. Diese Aufteilung wurde gewählt, um mögliche Übungseffekte auszuschließen.

#### 2.4.1.1 Methodik und Ergebnisse

Sowohl auf der Flexor- als auch auf der Extensorseite wurde 2 cm proximal des Handgelenks je ein Vibrator (Massagevibratoren, die für den Betrieb mit 220 V umgebaut worden waren) so befestigt, dass er ständig Hautkontakt hatte (Abb. 22). Der



Unterarm des Probanden wurde dabei in einer Schiene befestigt, so dass die Bewegungen nur aus dem Handgelenk und den Fingern heraus erfolgen konnten. Die Amplitude der Vibration wurde auf 1 mm festgelegt, die Frequenz auf 80 Hz, da Roll et al. (1989) gefunden haben, dass die Muskelspindeln bei dieser Frequenz am sensibelsten sind. Bei jedem Probanden wurde vor Experimentbeginn der Sitz der Vibratoren kontrolliert, indem die beiden Geräte nacheinander angeschaltet wurden. Alle Personen berichteten bei dieser einseitigen Vibration von einer Bewegungsillusion. Wurde der Vibrator auf der Flexorseite angeschaltet, so resultierte daraus eine Illusion in Extensorrichtung, bei Vibration der Extensorseite in Flexorrichtung. Anschließend wurden beide Vibratoren gemeinsam angeschaltet, wobei den Berichten nach die Bewegungsillusion verschwand und nur eine Taubheit und ein „komisches Gefühl“ der Hand zurück blieben. Wenn die Versuchsleiterin den Probanden berührte, fühlte sie die Vibration am stärksten am Handgelenk, aber auch distal bis in die Finger und proximal bis zum Ellbogen. Kleine Änderungen des Aufbaus werden in der Beschreibung der einzelnen Tests erläutert.

Da bei den benutzten Vibratoren die Frequenz nicht genau eingestellt werden konnte, wurde sie, ebenso wie die Amplitude, mit Hilfe eines Stroboskopes gemessen und eingestellt.



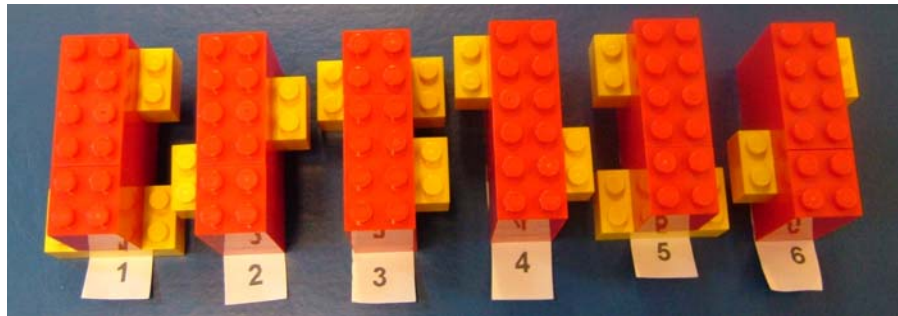
**Abb. 22: Sitz der Vibratoren**

Je ein Vibrator wurde auf der Flexor- und der Extensorseite 2 cm proximal des Handgelenks befestigt.

### *Erfühlen von Formen*

In diesem ersten Test sollten die Probanden ohne visuelle RM nur durch das Erfühlen Formen voneinander unterscheiden. Er wurde in ähnlicher Form bereits bei Dinse et al. (2005) verwendet. Vor den Probanden wurden auf Höhe der Plexiglasscheibe

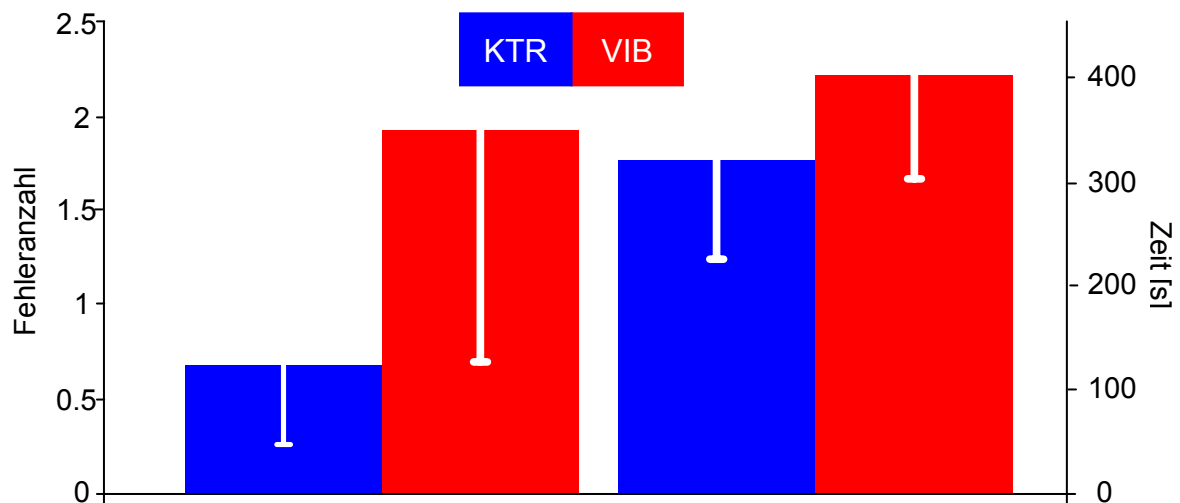
sechs ähnliche, aber in Details doch unterschiedliche Formen aus LEGO®Steinen aufgestellt (Abb. 23).



**Abb. 23: Im Experiment benutzte Formen**

Die gelben Steine verdeutlichen die Unterschiede zwischen den einzelnen Formen. Die Probanden mussten nach „blindem“ Ertasten einer Form deren Musternummer (1-6) nennen.

Die Probanden durften sich die Muster von allen Seiten genau anschauen, wobei die gelben Steine die Unterschiede zwischen den Formen verdeutlichten. Die Aufgabe war es, unterhalb der Plexiglasscheibe „blind“ die gereichten Objekte zu erfühlen und deren entsprechende Nummer des Musters zu nennen. Nach einer Übungsphase mit drei Formen wurden den Probanden nacheinander 30 Formen gereicht, die jeweils einem der Muster entsprachen. Die Probanden durften die Objekte nur in der rechten Hand bewegen und mussten durch Erfühlen die Form herausfinden und benennen. Die Anzahl der einzelnen Formen war dabei verschieden, war aber bei allen Probanden gleich. Ebenso war die Reihenfolge bei allen Probanden dieselbe. Den Probanden wurde mitgeteilt, dass bei diesem Test die benötigte Zeit und die Anzahl der Fehler wichtig waren. Sowohl für die Fehlerzahl als auch für die Zeit wurde eine einfaktorielle ANOVA mit dem Faktor *Bedingung* (VIB, KTR) durchgeführt. Es zeigte sich ein signifikanter Effekt für die Fehleranzahl ( $F_{1,14} = 14.7^{**}$ ), ebenso wie für die benötigte Zeit ( $F_{1,14} = 7.36^*$ ), wobei die Werte von VIB in beiden Fällen größer waren als die von KTR (Abb. 24).

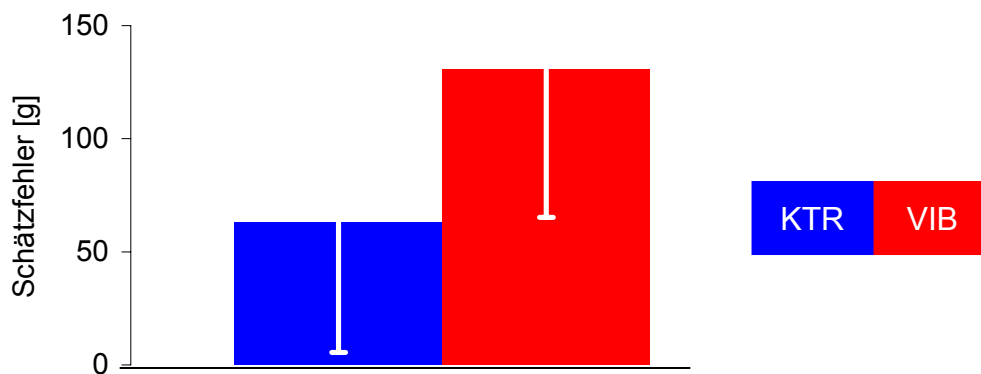


**Abb. 24: Ergebnisse des Erfühlens von Formen**

Gezeigt ist der Mittelwert der Fehleranzahl und der benötigten Zeit in der Kontrollbedingung (KTR) und der Bedingung mit Vibration (VIB). Die Balken geben die Standardabweichung an.

### *Druckeinschätzung*

In einem weiteren Test hielten die Probanden das stiftähnliche Ende eines Roboterarms (PHANTOM™ Premium 1.5A, SensAble Technologies, Inc.®) in ihrer rechten Hand. Dabei berührte die Spitze leicht die Oberfläche einer Waage. Die Probanden sollten versuchen, möglichst genau einen Druck zu erzeugen, der 350 Gramm entspricht. In den ersten fünf Übungsversuchen hatten sie dabei freie Sicht auf die Gewichtsanzeige. Anschließend mussten sie ohne visuelle RM je nach Gruppe mit oder ohne Vibration dreimal nacheinander versuchen die 350 Gramm zu erzeugen. Nach zwei Auffrischungsepisoden mit visueller RM folgten erneut drei Episoden ohne visuelle RM in der anderen Bedingung (VIB, KTR). Berechnet wurde der absolute Schätzfehler der einzelnen Versuche der Druckerzeugung. Anschließend wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholungen durchgeführt. Dabei wurden die Faktoren *Bedingung* (VIB, KTR) und *Episode* (3) und deren Interaktion untersucht. Es ergab sich nur ein signifikanter Effekt für die Bedingung ( $F_{1,7} = 12.08^*$ ), nicht aber für die Episode ( $F_{2,14} = 2.12^{n.s.}$ ) und die Interaktion ( $F_{2,14} = 1.62^{n.s.}$ ). Die Fehlerwerte bei den Versuchen mit Vibration lagen unterhalb derer ohne Vibration (Abb. 25).

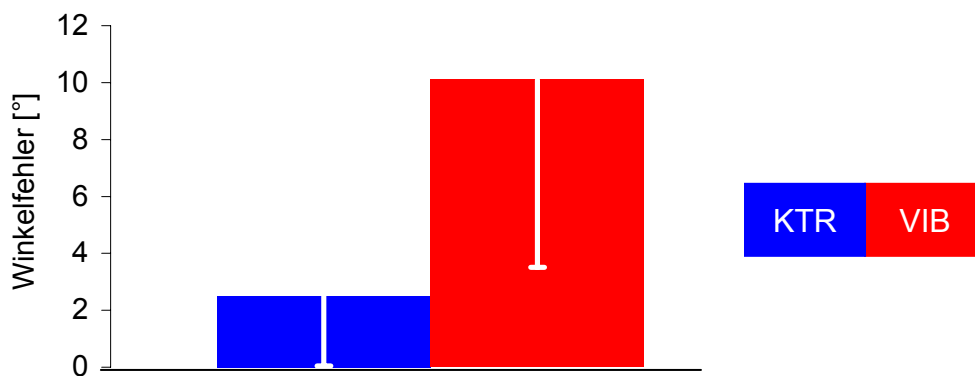


**Abb. 25: Ergebnisse der Druckeinschätzung**

Gezeigt ist der Mittelwert des absoluten Schätzfehlers für die Kontrollbedingung (KTR) und die Bedingung mit Vibration (VIB). Die Balken geben die Standardabweichung an.

#### *Winkelpositionen reproduzieren*

Die Probanden legten in diesem dritten Test ihre Unterarme parallel vor sich auf die Arbeitsfläche, ohne dass ihre Hände die Oberfläche berührten, und schlossen ihre Augen. Danach wurde die Position der rechten Hand des Probanden von der Versuchsleiterin in der Horizontalebene um bestimmte Winkel verändert. Die gleiche Position sollte der Proband mit der linken Hand ohne visuelle RM reproduzieren. Nach einer Übungsphase musste jede der vier vorgegebenen Winkelpositionen sowohl ohne als auch mit Vibration einmal erzeugt werden. Eine zweifaktorielle ANOVA der absoluten Winkelfehler zeigte, dass es einen Unterschied zwischen den *Bedingungen* gab ( $F_{1,7} = 27.02^{**}$ ), sich die Reproduktion der verschiedenen Winkelpositionen aber nicht voneinander unterschied (Faktor *Winkel* ( $F_{3,21} = 1.37^{n.s.}$ ), und dass die Interaktion Winkel x Bedingung ebenfalls keine Signifikanz aufwies ( $F_{3,21} = 1.10^{n.s.}$ ). Der Fehler der Reproduktionen mit Vibration lag in diesem Experiment erneut oberhalb dem ohne Vibration (Abb. 26).



**Abb. 26: Ergebnisse der Winkelreproduktion**

Dargestellt ist der Mittelwert des absoluten Winkelfehlers für die Kontrollbedingung (KTR) und die Bedingung mit Vibration (VIB). Die Balken geben die Standardabweichung an.

#### 2.4.1.2 Diskussion

Die Ergebnisse der drei Tests zeigten, dass die Vibration in allen drei Abschnitten zu signifikant größeren Fehlern führte und bei dem Erfühlen von Formen zusätzlich signifikant mehr Zeit benötigt wurde. Wie in den Abb. 23-25 zu erkennen ist, waren mit Vibration nicht nur die absoluten Fehlerwerte erhöht, sondern auch deren Standardabweichung, außer bei der Druckeinschätzung. Diese höhere Streuung der Werte besonders bei der Winkelreproduktion deutet darauf hin, dass die Kontrolle über die ausgeführten Bewegungen mit Vibration geringer war. Da durch das Versuchsdesign ein Übungseffekt ausgeschlossen werden kann, handelt es sich bei den Ergebnissen um die Auswirkungen des benutzten Vibrationsaufbaus. Somit eignet sich dieser Aufbau um die Propriozeption zu stören. Er wurde daher in den letzten beiden Experimenten dieser Arbeit benutzt, um die Rolle der Propriozeption bei der sensomotorischen Adaptation zu untersuchen.

## 2.4.2 Auswirkung von Vibration auf die Adaptation an eine visuelle Störung

Aus früheren Studien gibt es kontroverse Ergebnisse in Bezug auf die Rolle der Propriozeption bei motorischen Aufgaben. Das Ziel dieses Experiments, das im Rahmen einer Kooperation in Marseille durchgeführt wurde, war es daher, die Auswirkungen einer gestörten propriozeptiven RM auf die Adaptation bei gesunden Probanden zu erforschen. Die Störung der Propriozeption wurde in diesem Experiment durch die in Kapitel 2.4.1 beschriebene bilaterale Vibration der Beuge- und Strecksehnen am Handgelenk erreicht.

### 2.4.2.1 Spezielle Methodik

#### *Lernaufgabe*

Bei diesem Experiment bestand die LA aus ZB und die Störung aus einer Drehung der visuellen RM um  $+60^\circ$ , so dass Handbewegungen nach oben in Fadenkreuzbewegungen nach schräg links oben resultierten. Die Episoden waren 30 Sekunden lang und die Pause zwischen den einzelnen Episoden war selbstbestimmt, sie betrug ca. fünf Sekunden. Die Zielpunkte waren in diesem Experiment nur fünf cm von dem Mittelpunkt entfernt.

#### *Ablauf*

Alle Probanden wurden randomisiert zwei Gruppen von gleicher Größe zugeteilt. Die eine Gruppe (VIB) führte den gesamten Versuch, außer den ersten Teil der Gewöhnung, unter bilateraler Vibration der Handgelenkssehnen durch, um die Propriozeption zu stören. Die andere Gruppe (KTR) diente als Kontrollgruppe, bei der keine Vibration benutzt wurde. Der verwendete Aufbau entsprach dem in Kapitel 2.4.1 beschriebenen, jedoch wurden in Marseille Vibratoren der Firma Ling Dynamic Systems benutzt. Da mit der gleichen Frequenz und Amplitude gearbeitet wurde, sind hierdurch keine die Ergebnisse beeinflussenden Auswirkungen zu erwarten. Die Wirksamkeit der Vibration wurde wie im vorherigen Experiment getestet. Um aufbaubedingte Gruppenunterschiede zu vermeiden, wurden die Vibratoren und die Schiene bei beiden Gruppen auf dieselbe Weise angelegt. Dieses Experiment fand an zwei Tagen statt, wobei der erste Tag in der experimentübergreifenden Methodik beschrieben ist. Um in der VIB-Gruppe die Vibration nicht zu lang werden zu lassen,

wurden allerdings für alle Probanden im Verlauf des Experiments drei 1.5 minütige Pausen eingebaut. 22-26 Stunden später begann der zweite Tag mit einer Retentionsphase von sechs Episoden mit visueller RM und den gleichen Anforderungen bzgl. Störung und Vibration wie am Vortag. Darauf folgten sechs Episoden Deadadaptation. Der Ablauf dieses Experiments ist in Tab. 6 zu sehen.

Phasennr.	Gewöhnung		Grundbedingung		Adaptation			Beständigkeit	Auffrischung	Retention	Deadadaptation
	keine Nr.		1	2	3			4	5	6	7
vis. RM	ja	ja	nein	ja	ja	ja	Ja	nein	ja	ja	ja
Störung	0°	0°	0°	0°	60°	60°	60°	60°	60°	60°	0°
Vibration in VIB	nein	ja	ja	ja	ja	ja	Ja	ja	ja	ja	ja
Episodenzahl	3	3	3	3	12	12	6	3	5	6	6

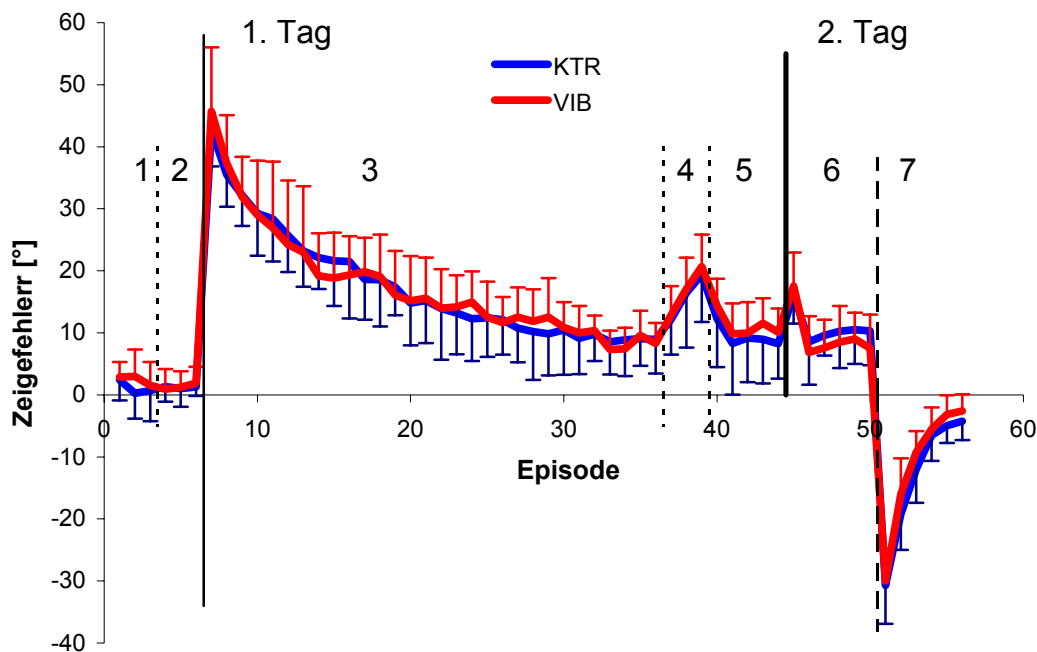
**Tab. 6: Ablauf des Experiments F**

Die Gruppe VIB arbeitete während des gesamten Experiments außer der 1. Gewöhnung mit Vibration. Vertikale graue Linien entsprechen einer Pause von 1.5 Minuten, die schwarze Linie indiziert den Beginn des zweiten Tages.

#### 2.4.2.2 Ergebnisse

Die aufgezeichneten Bewegungen entsprachen auf Grund der gleichen Störung denen aus der experimentübergreifenden Methodik (Abb. 4). Die Abb. 27 zeigt nicht nur, dass die Probanden in bekannter Weise adaptierten, sondern auch, dass die Ergebnisse beider Gruppen denselben Kurvenverlauf aufweisen: Während der initiale Richtungsfehler in den beiden Grundbedingungen ohne Störung sehr klein war, die Probanden die gestellte Aufgabe somit erfüllen konnten, stieg er zu Beginn der Rotation abrupt an und verringerte sich im Verlauf der Adaptationsphase wieder. Während der Phase der Persistenz ohne visuelle RM stieg der Fehler erneut etwas an, blieb jedoch weit unter dem Anfangsfehlerwert, so dass davon ausgegangen werden kann, dass das Erlernte auch ohne visuelle RM erhalten blieb. Am nächsten Tag, in der Retentionsphase, war nur der erste Wert erhöht, die anderen Werte waren vergleichbar mit denen am Ende des Vortages. Daraus kann geschlossen werden, dass das Erlernte auch über Nacht gespeichert werden konnte. In der Deadadaptation war der Fehler zu Beginn sehr groß in die entgegengesetzte Richtung, verbesserte sich aber sehr schnell. Die zweifaktorielle Varianzanalyse mit dem Zwischenfaktor *Gruppe* (VIB,

KTR) und dem Innerhalbfaktor *Episode* unterstützte diese Beobachtungen. Sie ergab einen signifikanten Effekt für Episode in allen Phasen außer den Grundbedingungen: Adaptation ( $F_{7,55,135.97} = 109.35^{***}$ ), Persistenz ( $F_{2,36} = 37.56^{***}$ ), Retention ( $F_{5,90} = 37.07^{***}$ ), Deadaptation ( $F_{3,2,57.68} = 427.68^{***}$ ). Es zeigten sich jedoch in keiner Phase Signifikanzen bezüglich der Gruppe und der Interaktion von Gruppe x Episode (alle  $p > 0.05$ ).



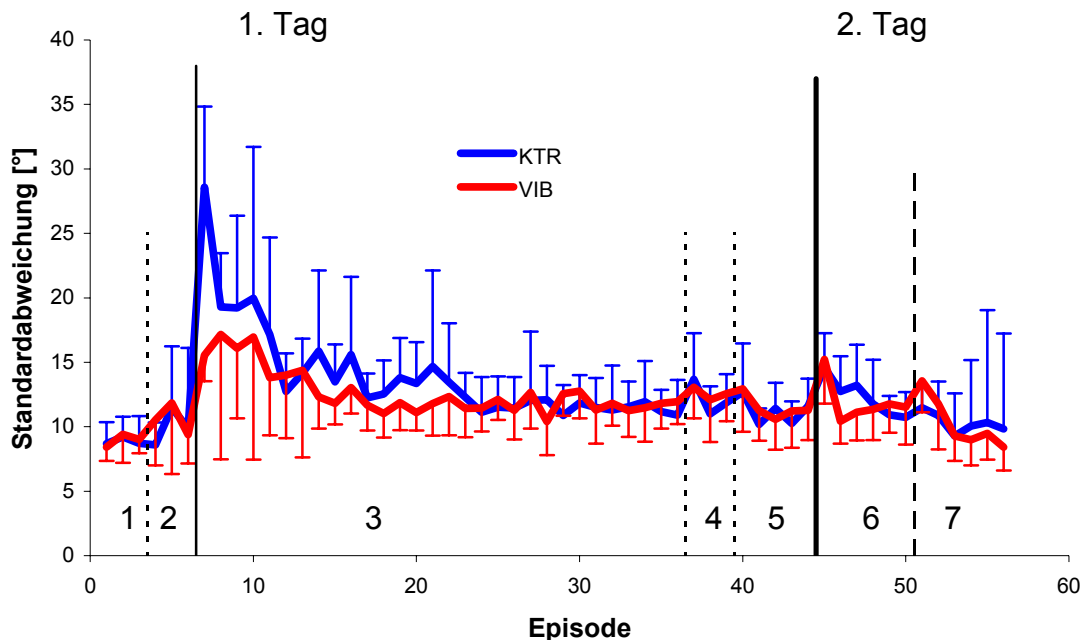
**Abb. 27: Zeitlicher Verlauf des initialen Zeigefehlers der beiden Gruppen**

Jede Kurve stellt die Mittelwerte über die Mediane aller zehn Probanden der jeweiligen Gruppe in der entsprechenden Episode dar. Die gepunkteten vertikalen Linien kennzeichnen die Änderung der visuellen RM, die dünne durchgezogene Linie stellt den Beginn der ersten Störung dar. Die dicke Linie steht für den Beginn des zweiten Tages, die Strichellinie weist auf die Änderung der Störung hin. Die Zahlen entsprechen den Nummern der einzelnen Phasen. Die Standardabweichungen sind durch die Balken dargestellt.

Da sich für den initialen Zeigefehler keine Unterschiede ergaben, wurde in diesem Experiment auch die Streuung der Daten untersucht. Dazu wurde die Standardabweichung der Fehlerwinkel innerhalb der Probanden berechnet, um herauszufinden, ob dort die gestörte Propriozeption Auswirkungen hatte. Die Standardabweichung des Initialfehlers zeigte einen ähnlichen Kurvenverlauf wie der Initialfehler selber (Abb. 28). Allerdings unterschieden sich hier die Kurvenverläufe der beiden Gruppen zu Beginn der Adaptationsphase, wobei VIB in den ersten Episoden unterhalb von KTR lag. Die ANOVA bestätigte diese Beobachtung und ergab in dieser Phase nicht nur einen signifikanten Effekt für den Faktor Episode ( $F_{6,71,120.89} = 7.335^{***}$ ) sondern



auch für die Interaktion Gruppe x Episode ( $F_{29,522} = 1.92^{**}$ ). Darüber hinaus zeigte sich erneut ein signifikanter Effekt für Episode in allen Phasen außer den Grundbedingungen: Persistenz ( $F_{2,36} = 5.62^{**}$ ), Retention ( $F_{5,90} = 7.14^{**}$ ) und Deadaptation ( $F_{2,19,39,45} = 3.27^*$ ).



**Abb. 28: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung des initialen Zeigefehlers (F)**

Jede Kurve stellt die Mittelwerte über die Mediane aller zehn Probanden der jeweiligen Gruppe in der entsprechenden Episode dar. Die Bedeutung der Linien und der Zahlen ist in Abb. 27 beschrieben. Die Standardabweichungen sind durch die Balken dargestellt.

#### 2.4.2.3 Diskussion

Vor Versuchsbeginn wurden unterschiedliche Möglichkeiten der Auswirkung von Vibration aufgezeigt: Zum einen wäre es möglich, dass die Propriozeption, die bei visuellen Drehungen nicht mit der visuellen RM übereinstimmt, die Adaptation eher behindert. Somit sollte die Gruppe, deren Propriozeption durch Vibration gestört war, schneller adaptieren können. Zum anderen weisen z. B. die Ergebnisse von Rao und Gordon (2001) darauf hin, dass die Genauigkeit von Zeigebewegungen durch taktile Informationen verbessert wird.

Auch in diesem Experiment zeigte sich in allen Phasen ein typischer Kurvenverlauf des initialen Zeigefehlers für die Adaptation an eine Rotation der visuellen RM. Die Adaptationskurven waren jedoch für beide Gruppen sehr ähnlich und es zeigten sich

keine signifikanten Gruppenunterschiede, so dass sich beide Überlegungen nicht bestätigten. Die Ergebnisse vermitteln somit den Eindruck, dass die Propriozeption bei der Adaptation an eine visuelle Störung nicht nötig ist, aber auch nicht stört. Sie unterstützen damit das Ergebnis des zweiten Vorexperiments, das keinen Einfluss einer verstärkten propriozeptiven RM ergab. Daraus kann gefolgert werden, dass der Konflikt zwischen der visuellen und der propriozeptiven RM nicht ausschlaggebend für die Adaptation und somit den Verlauf des Zeigefehlers ist. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu dem von Vercher et al. (2003), die eine mechanische Störung benutzten. Sie zeigten, dass sich das okulomotorische Kontrollsystem nur dann anpasst, wenn die propriozeptive RM über die Natur der Störung wahrheitsgemäß ist. Auch Ghez et al. (1990) fanden in ihrer Studie mit deafferentierten Patienten, die einzelne schnelle und unkorrigierte Zeigebewegungen ausführen sollten, dass die propriozeptive Information der Hand nötig ist, um genaue Bewegungen zu programmieren. Eine mögliche Fehlbenutzung der Vibration und somit keine Wirkung auf die Propriozeption kann als Interpretation des fehlenden Unterschiedes ausgeschlossen werden, da in dem Kontrollexperiment alle drei getesteten Parameter mit Vibration signifikant schlechtere Ergebnisse zeigten.

Die Standardabweichung innerhalb der Episoden eines jeden Probanden war zu Beginn der Adaptationsphase in der Kontrollgruppe höher als in der Vibrationsgruppe. Wird die erhöhte Streuung durch exploratives Verhalten erklärt, so kann daraus geschlossen werden, dass die Gruppe VIB weniger versuchte, die neue sensomotorische Situation durch das Ausprobieren verschiedener Strategien zu erlernen. Dies könnte darin begründet sein, dass die Probanden sich nicht auf ihre propriozeptiven Signale verließen, die auf Grund der Vibration nicht mehr zuverlässig waren, sondern nur die visuelle RM für die Anpassung benutzten. Diese Überlegungen werden durch die Aussagen über die Dominanz der visuellen RM bestärkt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Adaptationsverlauf trotz der verschiedenen Herangehensweisen der beiden Gruppen nicht unterschied. Es wurde deutlich, dass sich die Probanden bei der Adaptation an visuelle Rotationen hauptsächlich auf die visuelle RM verlassen, so dass eine Änderung der propriozeptiven Signale keine Auswirkungen hat. Dieses Phänomen der Dominanz der visuellen RM wird in der Literatur mit *visual capture* beschrieben (Tastevin 1937, zitiert in Hay et al. 1965). Auch die

Ergebnisse von Scheidt et al. (2005) verdeutlichen die wichtige Rolle der visuellen RM. Die Autoren zeigten, dass Probanden nicht an eine Störung adaptieren, wenn die visuelle RM derart manipuliert ist, dass sie die Existenz der Störung ignoriert.

Da sich in diesem Experiment kein relevanter Einfluss der Propriozeption bei der Adaptation zeigte, Vercher et al. (2003) in ihrer Studie mit einer mechanischen Störung jedoch zu einem anderen Schluss kamen, sollte das nächste Experiment durch einen Tausch der visuellen Rotation gegen eine mechanische Störung klären, ob dieser Unterschied auf Grund der verschiedenen Naturen der Störungen entstanden ist.

### 2.4.3 Auswirkung von Vibration auf die Adaptation an eine mechanische Störung

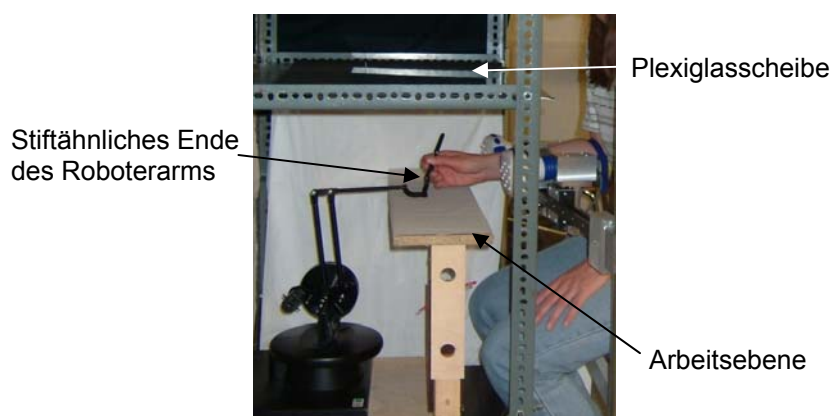
Vercher et al. (2003) fanden bei der Benutzung einer mechanischen Störung eine Auswirkung von Vibration. Dieses Experiment diente deshalb dazu, herauszufinden, ob das Ergebnis aus dem vorherigen Experiment darin begründet liegt, dass es die Adaptation an eine visuelle Störung erforderte. Wie Abeele und Bock (2003) schilderten, besteht die Möglichkeit, dass die Adaptation an visuelle und mechanische Störungen auf unterschiedlichen Mechanismen beruht. Daher wurde die visuelle +60°-Drehung durch eine mechanische Ablenkung mit Hilfe eines Roboter-Aufbaus ersetzt.

#### 2.4.3.1 Spezielle Methodik

Bei diesem Experiment wurde versucht, die Voraussetzungen und Abläufe möglichst denen des vorherigen Experiments anzugleichen, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

#### *Lernaufgabe*

Da das zweite Vorexperiment ergeben hatte, dass der Stab keine sinnvolle mechanische Störung für die Untersuchung der Adaptation darstellt, wurde für dieses Experiment der von Prof. Dr. Herbert Heuer (Universität Dortmund) zur Verfügung gestellte Roboterarm benutzt (Abb. 29).



#### **Abb. 29: Darstellung des Roboterbaus**

Gezeigt ist der Roboterarm (Phantom), der die mechanische Störung erzeugte. Die Projektion des virtuellen Bildes erfolgte wie in Abb. 1b.

Die LA bestand erneut aus Zeigebewegungen. Um Adaptation hervorzurufen, wurde eine geschwindigkeitsabhängige mechanische Störung genutzt, die mit Hilfe des Roboterbaus erzeugt wurde. Das stiftähnliche Ende des Roboterarms wurde mit leichter Berührung der Arbeitsebene für die ZB benutzt. Die Episoden waren erneut 30 Sekunden lang und die Pause zwischen den einzelnen Episoden war festgelegt auf fünf Sekunden.

### Ablauf

Die Probanden wurden zufällig zwei Gruppen von gleicher Größe zugeteilt. Die Anpassung der Vibratoren und deren richtiger Sitz wurden, wie in dem Kontrollexperiment in Kapitel 2.4.1 beschrieben, geprüft. Der erste Tag des Experiments entsprach dem in der experimentübergreifenden Methodik beschriebenen. Allerdings wurden sechs 1.5 minütige Pausen eingebaut, um einer Ermüdung auf Grund der Vibration und der Kraffteinwirkung vorzubeugen. Am zweiten Tag erfolgte, wie in dem vorherigen Experiment, die Überprüfung der Nacheffekte durch Retention und Deadaptation von jeweils sechs Episoden (Tab. 7).

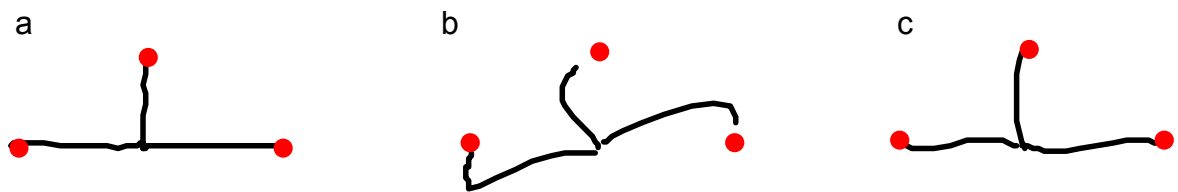
	Gewöhnung		Grundbedingung		Adaptation				Beständigkeit	Auffrischung	Retention	Deadaptation
Phasennummer	keine Nr.		1	2	3				4	5	6	7
vis. RM	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja
Störung	ohne	ohne	ohne	ohne	Kraft	Kraft	Kraft	Kraft	Kraft	Kraft	Kraft	ohne
Vibration in VIB	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Episodenzahl	3	3	3	3	8	8	8	6	3	5	6	6

**Tab. 7: Ablauf des Experiments G**

VIB arbeitete während des gesamten Experiments außer der ersten Gewöhnung mit Vibration. Graue Linien entsprechen einer Pause von 1.5 Minuten, die schwarze Linie indiziert den Beginn des zweiten Tages.

### 2.4.3.2 Ergebnisse

Da die Originalbewegungen bei dieser mechanischen Störung etwas anders aussehen als bei den bisherigen visuellen Rotationen, zeigt die Abb. 30 Bewegungen zu drei der acht Ziele während der Grundbedingung (a), zu Beginn der Adaptationsphase (b) und an deren Ende (c).

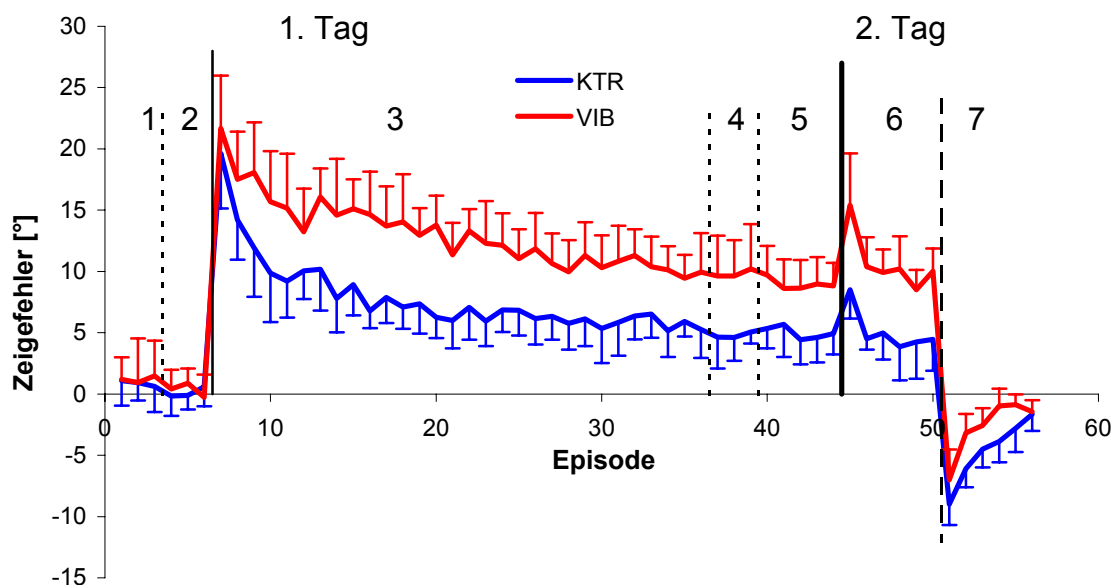


**Abb. 30: Rohdaten der Zeigebewegungen**

Gezeigt sind typische ZB in der Grundbedingung (a), zu Beginn der mechanischen Störung (b) und am Ende der Adaptationsphase (c). Bei dieser mechanischen Störung stimmten die Bewegungen der Hand und des Fadenkeuzes überein.

Aus diesen Rohdaten wurde für jeden Probanden der initiale Zeigefehler bestimmt.

Abb. 31 zeigt die Mittelwertkurve für beide Gruppen über den Verlauf der Episoden.



**Abb. 31: Verlauf des initialen Zeigefehlers Experiment G**

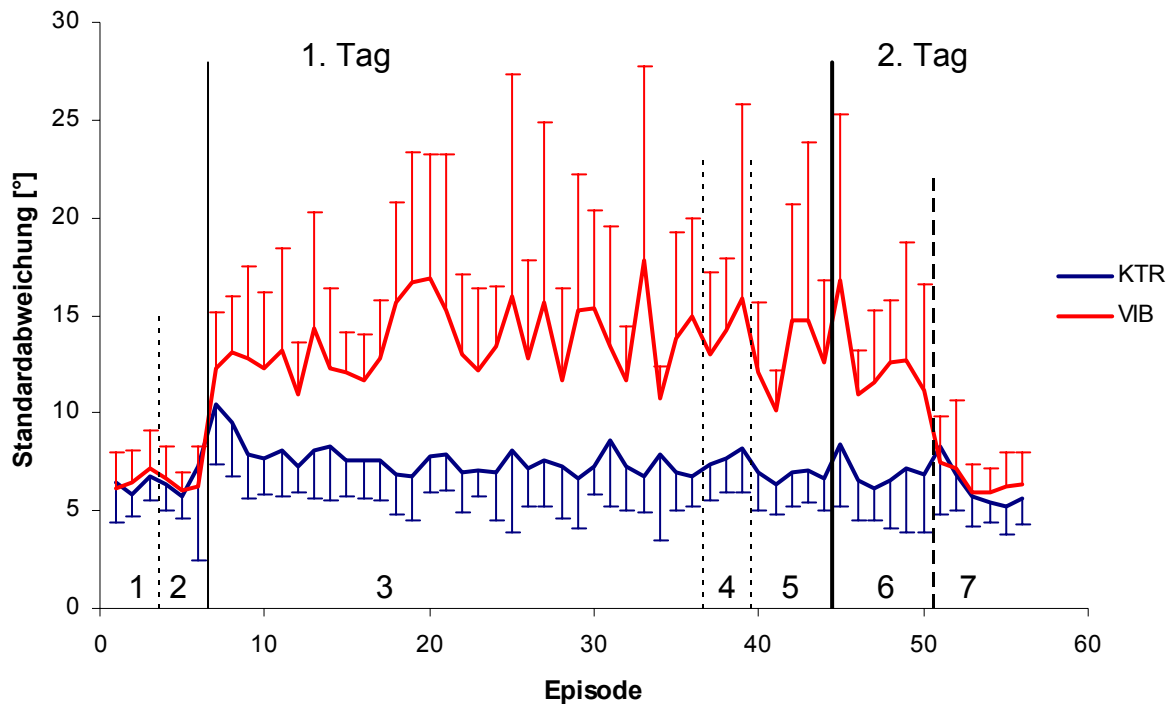
Jede Kurve stellt die Mittelwerte über die Mediane aller zehn Probanden der jeweiligen Gruppe in der entsprechenden Episode dar. Die Standardabweichungen sind durch die Balken dargestellt. Die gepunkteten vertikalen Linien kennzeichnen die Änderung der visuellen RM, die dünne durchgezogene Linie stellt den Beginn der ersten Störung dar. Die dicke Linie steht für den Beginn des zweiten Tages, die Strichellinie weist auf die Änderung der Störung hin. Die Zahlen 1-7 entsprechen den Nummern der einzelnen Phasen.

Wie in den vorangegangenen Experimenten erfüllten die Probanden in beiden Grundbedingungen die Anforderungen mit großer Genauigkeit. Eine Varianzanalyse mit Messwiederholungen mit dem Zwischenfaktor *Gruppe* (VIB, KTR) und dem Innerfaktor *Episode* (3, 6 oder 30) ergab keine Signifikanzen. Mit der einsetzenden Störung stieg der Zeigefehler abrupt an, bevor er im Verlauf der Adaptationsphase wieder abnahm. Hierbei fielen die Fehlerwerte der Gruppe KTR nicht nur schneller ab, sondern

erreichten auch einen niedrigeren Wert. Die ANOVA ergab Signifikanzen sowohl für die Faktoren Gruppe ( $F_{1,18} = 49.36^{***}$ ) und Episode ( $F_{22,56,406.15} = 30.56^{***}$ ) als auch für deren Interaktion ( $F_{22,56,406.15} = 1.59^*$ ). VIB wies dabei einen höheren Wert auf ( $13.08^\circ$  gegenüber  $7.82^\circ$ ). In der Phase der Persistenz wurde deutlich, dass beide Gruppen ihr Gelerntes trotz fehlender visueller RM behalten haben, was von der ANOVA mit der einzigen Signifikanz des Faktors Gruppe ( $F_{1,18} = 27.07^{***}$ ) bestätigt wurde, wobei VIB erneut oberhalb von KTR lag. Dieses zeigte sich auch in der Retentionsphase am zweiten Tag, da nur der erste Wert in beiden Gruppen gegenüber dem Plateau des Vortages leicht erhöht war und danach direkt der Wert des Vortages erreicht wurde. Die Varianzanalyse bestätigte den Gruppenunterschied erneut ( $F_{1,18} = 82.95^{***}$ ) und auch die Veränderung über die Episoden ( $F_{5,90} = 15.69^{***}$ ), wobei sich nur die erste Episode signifikant von allen anderen unterschied (alle  $p < 0.001$ ). Die Deadaptation zeigte sich in beiden Gruppen durch einen Zeigefehler in die entgegengesetzte Richtung. Dieser war bei der Gruppe KTR zunächst größer, durch einen steileren Abfall als bei VIB erreichten beide Gruppen am Ende dieser Phase allerdings wieder einen Wert nahe „0“. Die ANOVA bestätigte diese Beobachtungen durch Signifikanzen für beide Faktoren und deren Interaktion ( $F_{5,90} = 3.15^*$ ). Innerhalb der Gruppen ( $F_{1,18} = 16.21^{***}$ ) lag VIB ( $-2.67^\circ$ ) oberhalb von KTR ( $-4.65$ ). Bei den Episoden ( $F_{5,90} = 75.33^{***}$ ) war nur die fünfte Episode nicht unterschiedlich von der vierten und der sechsten.

Auch in diesem Experiment wurde auf Grund der Vergleichbarkeit mit dem vorherigen Vibrationsexperiment die Standardabweichung des initialen Zeigefehlers innerhalb eines jeden Probanden bestimmt. Die Mittelwertkurven der beiden Gruppen sind in Abb. 32 dargestellt. Die Standardabweichung des initialen Zeigefehlers unterschied sich in den beiden Grundbedingungen nicht signifikant. Sie stieg bei beiden Gruppen mit Beginn der Störung an. Dieser Anstieg war für die Gruppe VIB höher als für die Kontrollgruppe und blieb in einem instabilen Verlauf ungefähr auf der gleichen Höhe. Die ANOVA unterstützte diese Beobachtung durch die einzige Signifikanz der Phase für den Faktor Gruppe ( $F_{1,18} = 45.69^{***}$ ). Auch in der Persistenz blieb dieser Gruppenunterschied erhalten ( $F_{1,18} = 21.31^{***}$ ). In der Retention zeigte sich neben dem Gruppenunterschied ( $F_{1,18} = 24.76^{***}$ ) auch ein Episodeneffekt ( $F_{2,3,41.7} = 3.24^*$ ), der auf dem Anstieg in der ersten Episode beruhte, wie der Post hoc-Test zeigte (alle  $p < 0.01$ ). Erst in der Deadaptation fielen die Werte der Standardabweichung in der

VIB-Gruppe auf das Ausgangsniveau, auf dem sich auch die Werte der Gruppe KTR befanden. Die ANOVA, die nur einen signifikanten Effekt für den Faktor Episode ausgab ( $F_{3,9,70,9} = 5.14^{**}$ ), bestätigte diese Beobachtung. Der Post hoc-Test ergab, dass sich die erste ( $p < 0.001$ ) und die zweite ( $p < 0.05$ ) Episode signifikant von den anderen unterschieden.



**Abb. 32: Zeitlicher Verlauf der Standardabweichung des initialen Zeigefehlers (G)**

Jede Kurve stellt die Mittelwerte über die Mediane aller zehn Probanden der jeweiligen Gruppe in der entsprechenden Episode dar. Die Standardabweichungen sind durch die Balken angegeben. Die Linien und die Zahlen sind in Abb. 30 erläutert.

#### 2.4.3.3 Diskussion

Die Adaptationskurve verlief auch in diesem Experiment wie in vielen früheren Studien. Nach geringen Fehlern in den Grundbedingungen stiegen die Fehlerwerte mit Beginn der Störung abrupt an und nahmen im Verlauf der Adaptationsphase ab. Allerdings ergab sich in diesem Experiment ein Unterschied zwischen den Gruppen VIB und KTR. Die Ergebnisse zeigen, dass die Adaptation an eine mechanische Störung durch Vibration, also eine gestörte Propriozeption, langsamer und weniger vollständig war als in der Kontrollbedingung. Dieser Unterschied zeigte sich auch in den folgenden Phasen des Experiments. Da die Werte der Gruppe VIB in der Deadaptation niedriger waren und schneller die Nulllinie erreichten, wurde bestätigt, dass die vorher-



rige Adaptation weniger vollständig war als die der Kontrollgruppe. Diese Ergebnisse in Zusammenhang mit denen des vorherigen Experiments unterstützen die Annahmen von Abeele und Bock (2003) sowie Krakauer et al (1999), dass die Adaptation an visuelle und mechanische Störungen auf unterschiedlichen Mechanismen beruht.

Ein mögliche Erklärung für die unterschiedliche Rolle der Propriozeption bei der Adaptation an visuelle und mechanische Störungen könnte die verschiedene Art der Auslösung der Störung sein. Bei visuellen Störungen verändern sich die auf die Hand einwirkenden Kräfte nicht und die Bewegung der Hand bleibt auch mit Störungsbeginn zunächst gleich. Erst durch die veränderte visuelle RM kommt es zu einer Änderung der Bewegung und zur Adaptation an die Störung. Diese besteht bei visuellen Transformationen demnach zwischen der intendierten Handlung und der Propriozeption auf der einen und der visuellen RM auf der anderen Seite. Bei mechanischen Störungen dagegen wirken mit Störungsbeginn Kräfte auf die Handbewegung des Probanden ein, so dass die Bewegungen tatsächlich verändert und abgelenkt werden. Die Störung besteht hier demnach zwischen der visuellen und der propriozeptiven RM auf der einen Seite und der beabsichtigten Handlung auf der anderen Seite. Die propriozeptive RM wirkt bei diesen beiden Störungsarten also auf unterschiedlichen Seiten. Daher scheint es überzeugend, dass ihre Rolle bei der Adaptation an die beiden Störungsarten ebenfalls unterschiedlich ist.

Im Gegensatz zu der Standardabweichung des initialen Zeigefehlers bei der visuellen Störung, wo zu Beginn der Adaptation die Kontrollprobanden höhere Werte aufwiesen, stiegen die Werte der Abweichung in diesem Experiment für die Vibrationsgruppe mehr an und blieben bis zu der Phase der Deadaptation auf dem hohen Niveau. Die erhöhte Streuung in diesem Experiment ist wahrscheinlich nicht auf ein exploratives Verhalten zurückzuführen, wie in dem vorherigen Experiment. Da hier die Gruppe VIB höhere Werte zeigte, ist es wahrscheinlicher, dass sie durch die gestörte Propriozeption die Handposition durch die einwirkende Kraft nicht genau fühlen können. Dafür sprechen sowohl die Ergebnisse der Voruntersuchung, besonders die der Druckeinschätzung und der Winkelreproduktion, als auch die Annahme von Ghez et al. (1990), dass Propriozeption wichtig ist, um eine stabile Handposition zu halten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Rolle der Propriozeption bei der Adaptation an verschiedene Störungsnaturen unterschiedlich ist. Da es sich bei der visuel-

len Rotation jedoch um eine positionsabhängige und bei der mechanischen um eine nicht-positionsabhängige Störung handelte, könnte auch darin der Grund für die unterschiedliche Rolle der Propriozeption liegen.

## 3 Experimentübergreifende Diskussion

### 3.1 Diskussion der Ergebnisse und Ausblick

Die Ergebnisse der Adaptationsexperimente dieser Arbeit unterstützen die Aussagen in der Literatur, dass sich die Genauigkeit einer motorischen Leistung abrupt verschlechtert, wenn eine Störung eingebracht wird. Diese Verschlechterung zeigte sich nicht nur bei Störungen der visuellen Rückmeldung, bei denen die visuell wahrgenommene Fadenkreuzbewegung von der propriozeptiv gefühlten eigenen Bewegung abweicht, sondern auch bei mechanischen Störungen, bei denen sowohl die visuell wahrgenommene als auch die propriozeptiv gefühlte Bewegung von der Sollbewegung abweicht. Durch diese Abweichung kommt es zu einem Lernprozess im zentralen Nervensystem, wodurch die Fehler als Auswirkung der Störung im Verlauf der Adaptationsphase geringer werden. Der in den Experimenten dieser Arbeit gefundene, typische Verlauf der Adaptationskurven bestätigt ein Auftreten der sensomotorischen Adaptation sowohl bei verschiedenen Bewegungsformen (Folgebewegungen und Zeigebewegungen) als auch bei unterschiedlichen Störungsnaturen (visuell und mechanisch) und Störungsarten (positions- und nicht-positionsabhängig). In allen Experimenten reichte die visuelle Rückmeldung der Handbewegung über ein Fadenkreuz aus. Diese Ergebnisse widersprechen damit der Meinung von Clower und Boussaoud (2000), dass Nacheffekte nur dann auftreten, wenn die wirkliche Fingerbewegung sichtbar ist und nicht nur deren repräsentative Rückmeldung. Es zeigte sich in Übereinstimmung mit Abeele und Bock (2003) sowie Krakauer et al (1999) aber auch, dass den Lernprozessen in Folge verschiedener Störungen unterschiedliche Mechanismen zu Grunde liegen. Daher können Verallgemeinerungen immer nur unter bestimmten Voraussetzungen getroffen werden, die genau definiert sein müssen. Da zusätzlich zu der Adaptationsphase je nach Experiment auch die Persistenz, die Retention, der Transfer und die Deadaptation getestet wurden, konnte gezeigt werden, dass das Gelernte gespeichert und wieder abgerufen werden kann (Shadmehr und Mussa-Ivaldi 1994; Brashers-Krug et al. 1996; Bock 2001; Wigmore et al. 2002).

Das Experiment zum Einfluss der Zielpunktverteilung bei Zeigebewegungen hinterfragte die Ergebnisse der Studie von Krakauer et al. (2000) genauer, die die Anzahl und die Verteilung der Zielpunkte nicht getrennt voneinander variierten. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Anzahl von größerer Bedeutung ist als deren Verteilung. Allerdings zeigte sich in dem Transfer auch ein Einfluss des Arbeitsfeldes, so dass es sinnvoll erscheint, sowohl auf die Anzahl als auch auf die Verteilung von Adaptationsstimuli bei Studien mit Zeigebewegungen zu achten. Dieses gilt nicht nur bei dem Vergleich mit vorhandenen Daten, sondern auch bei der Erstellung neuer Paradigmen. Eine überraschende Erkenntnis dieses Experiments war, dass auch die Richtung der Rotation der visuellen Rückmeldung einen Einfluss auf die Adaptationskurve hat. Daher sollte sie bei Vergleichen und auch bei der Erstellung neuer Designs stärker berücksichtigt werden als bisher. Da dieser Effekt auch bei mechanischen Störungen denkbar ist, sollte außerdem untersucht werden, ob bei der Störungsnatur die Richtung der Ablenkung ebenfalls die Ergebnisse beeinflusst.

Die Ergebnisse des Experiments zur Erprobung einer mechanischen Störung zeigen, dass der elastische Stab nicht dafür geeignet ist, in Adaptationsexperimenten als mechanische Störung eingesetzt zu werden. Es ergab sich nur für den initialen Zeigefehler eine typische Adaptationskurve. Diese entstand jedoch auf Grund der visuellen Rotation und wurde nicht vom elastischen Stab beeinflusst. Somit konnte keine Variable gefunden werden, welche die Adaptation an den Stab beschreibt. Wenn auch in Zukunft in der Arbeitsgruppe Bewegungsphysiologie der Deutschen Sporthochschule Köln mit mechanischen Störungen gearbeitet werden soll, empfiehlt es sich, die Gelder für die Anschaffung eines etablierten Aufbaus zu beantragen. Die Untersuchung der zweiten Fragestellung, der Komposition und der Dekomposition, in diesem Experiment ergab, dass für den initialen Zeigefehler sowohl ein Kompositions- als auch ein Dekompositionsvorteil auftrat. Dadurch kann nicht nur eine Speicherung der erstellten Transformationsregeln bestätigt werden, sondern auch die von Flanagan et al. (1999) angenommene modulare Struktur, die das Zusammensetzen und das Zerlegen von Gelerntem ermöglicht. Diese beschriebenen Vorteile der Komposition und der Dekomposition sind demnach auf zwei positionsabhängige Störungen mit unabhängiger Wirkrichtung (entgegen und seitlich zur Bewegungsrichtung) zu übertragen. Allerdings sind in diesem Experiment die Auswirkungen des elastischen Stabes als gering einzustufen, da nur der von ihm nicht beeinflusste initiale Richtungsfehler betrachtet

wurde. In dem vorliegenden Experiment wurden die Störungen zwar nicht einzeln aufeinander folgend durchgeführt, so dass Interferenzeffekte nicht auf die gleiche Weise gemessen werden konnten wie bei Tong et al. (2002) und Bock (2003), doch eventuell können die Ergebnisse die Annahmen der Autoren erweitern. Sie berücksichtigten entweder nur die Kinematik der Störung, oder die Natur der Störung und deren kinematische Verbindung, nicht jedoch deren Wirkrichtung.

Die Experimente C und D, die mit der Doppelaufgaben-Methode die Rolle der Kognition bei der sensomotorischen Adaptation untersuchten, zeigen, dass der Ressourcenbedarf zu Beginn des Lernens höher ist als am Ende, wie von Lintern und Wickens (1991) bereits postuliert. Allerdings konnten die beschriebenen Phasen des motorischen Lernens (Fitts 1964) nicht experimentell bestätigt werden, da selbst eine fast identische Reproduktion des Experiments von Eversheim und Bock (2001) nicht zu vergleichbaren Ergebnissen im Hinblick auf das Muster des Ressourcenbedarfs führte. Da bei den benutzten Programmen keine Differenzen angenommen werden, liegt der einzige wichtige Unterschied zwischen Experiment C und dem von Eversheim und Bock (2001) wahrscheinlich in den Anweisungen der Versuchsleiter. In der Literatur sind Auswirkungen der Verteilung der Aufmerksamkeit bei Doppelaufgaben auf die Ergebnisse beschrieben (Marsh und Geel 2000). Aus diesem Grund müsste ein weiteres Experiment durchgeführt werden, in dem die Anweisungen für alle Probanden einheitlich und unabhängig vom Versuchsleiter sind. Unter diesem Gesichtspunkt ist ein genauerer Vergleich von den Ergebnissen des Experiments D dieser Arbeit und denen von Eversheim und Bock (2001) ebenfalls nicht sinnvoll, da dort nicht nur die Folgebewegungen gegen Zeigebewegungen und manuelle gegen verbale Reaktionsaufgaben getauscht wurden, sondern das Experiment wurde auch von einer anderen Versuchsleiterin betreut. Sollte sich allerdings herausstellen, dass die Anweisungen des Versuchsleiters einen so großen Einfluss auf die Ergebnisse haben, ist deren allgemeine Gültigkeit anzuzweifeln. Bei der gemeinsamen Betrachtung der Ergebnisse der beiden Doppelaufgaben-Experimente dieser Arbeit wird deutlich, dass mit Beginn der Transformation höhere  $\Delta$ Fehler für die Doppelaufgaben mit manuellen Zweitaufgaben als für jene mit verbalen auftraten, unabhängig von dem weiteren Verlauf der Kurven. Da sich dieser Unterschied erst während der Adaptationsphase und nicht bereits in der Grundbedingung zeigte, scheint es sich nicht um eine generelle peripher-motorische Interferenz auf Grund der gleichen Ausgangsmo-

dalitäten zu handeln (Klapp et al. 1987; Swinnen und Walter 1991), sondern um ein mit zunehmendem Ressourcenbedarf auftretendes Phänomen. In dem zweiten Experiment waren die  $\Delta$ Zeigefehler bei den verbalen Aufgaben mit vier Antwortmöglichkeiten höher als bei der mit nur einer Antwortmöglichkeit. Für die Entscheidung zwischen vier möglichen Antworten in der Reaktionsaufgabe wurden demnach Ressourcen beansprucht, die dadurch nicht mehr für die Erfüllung der Zeigeaufgabe zur Verfügung standen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass also kein sich im Zeitverlauf änderndes Muster des Bedarfs an verschiedenen Ressourcen ergab, sondern nur ein mit Beginn der Adaptationsphase ansteigender Bedarf an Ressourcen für die Antwortvorbereitung. Die Reaktionszeiten der beiden verbalen Zweitaufgaben mit vier Antwortmöglichkeiten ohne Vorabinformation, und die 90°-Rotation der Antwort waren in beiden Experimenten grundsätzlich signifikant höher als die der manuellen. Da sich in Experiment D jedoch kein Unterschied zwischen den beiden anderen verbalen Aufgaben und der manuellen Aufgabe zeigte, können die unterschiedlichen Aufzeichnungsgeräte kein Grund dafür sein, wie in Experiment C vermutet wurde. Dieser Unterschied scheint somit auf die vermehrt benötigten Ressourcen der Antwortwahl und der visuell-räumlichen Verarbeitung zurückzuführen zu sein. Allerdings zeigte sich dieser Unterschied in Experiment C nur bei den verbalen Aufgaben, nicht aber, wie bei Eversheim und Bock (2001), bei den manuellen.

Die Ergebnisse der Experimente E und G mit Vibration zeigen, dass der benutzte Vibrationsaufbau geeignet ist, um in weiteren Studien zur Störung der Propriozeption eingesetzt zu werden. In den beiden Experimenten F und G ergab sich ein Hinweis auf eine veränderte Rolle der Propriozeption bei der Adaptation an verschiedene Transformationen. Die propriozeptive Rückmeldung wirkt bei einer visuellen Störung auf der Seite der beabsichtigten Handlung und bei einer mechanischen Störung auf der Seite der visuellen Rückmeldung. Es scheint daher überzeugend, dass dieser „Seitenwechsel“ zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. In diesen beiden Adaptationsexperimenten wurde allerdings nicht nur die Natur der Störung geändert, indem eine visuelle und eine mechanische Störung miteinander verglichen wurden, sondern auch die Art der Störung, indem eine positionsabhängige mit einer nicht-positionsabhängigen Störung verglichen wurde. Sinnvoll erscheinen daher zwei Zusatzexperimente, in denen zum einen die Adaptation an eine nicht-positionsabhängige visuelle und zum anderen an eine positionsabhängige mechanische Störung erforscht wer-

den. Ersteres wird momentan in einem Experiment der Arbeitsgruppe Bewegungsphysiologie der Deutschen Sporthochschule Köln untersucht. Vorläufige Ergebnisse weisen darauf hin, dass es keinen Unterschied zwischen der Gruppe mit Vibration und der Kontrollgruppe gibt (persönliche Kommunikation). Demnach scheint nicht die Art der Störung sondern deren Natur entscheidend zu sein. Allerdings sollten die endgültigen Ergebnisse abgewartet werden, da beide Gruppen bei der benutzten geschwindigkeitsabhängigen visuellen Störung nur eine geringe Adaptation aufwiesen. Sowohl mit dem in Experiment B beschriebenen elastischen Stab als auch durch erste Voruntersuchungen mit einer bewegungsrichtungsabhängigen Störung mit dem Roboteraufbau wurden in der Arbeitsgruppe Bewegungsphysiologie bereits zwei positionsabhängige mechanische Störungen erprobt. Leider war die Adaptationsphase in beiden Fällen sehr kurz, so dass eine Auswertung nicht möglich war. Es sollte daher weiter erforscht werden, welche Störung sich dafür eignet. Sehr interessant wäre die Untersuchung größerer Bewegungen, die den Alltagsbewegungen eher entsprechen als kleine Zeigebewegungen mit einer Amplitude von nur fünf Zentimetern. Shadmehr und Brashers-Krug (1997) fanden mit einer bewegungsrichtungsabhängigen mechanischen Störung ebenso wie Tong et al. (2002) mit einem positionsabhängigen Drehkraftfeld bei Benutzung größerer Bewegungsamplituden höhere Fehler und sinnvolle Adaptationskurven. Daher kann angenommen werden, dass eine größere Anzahl von beteiligten Gelenken und somit mehr Freiheitsgraden nicht nur zu höheren Fehlerwerten führt, sondern diese auch in dem typischen Kurvenverlauf geringer werden. Von Interesse wären daher weitere Experimente, die darüber Aufschluss geben können, ob diese Annahme zutrifft.

Weiterhin wäre es interessant, in einer Studie die Experimente zur Rolle der Kognition und der Rolle der Propriozeption zu kombinieren, indem die Vibration in einem Doppelaufgaben-Experiment eingesetzt wird. Damit könnte untersucht werden, ob sich sowohl die Adaptationskurve der Einzelaufgabe als auch die der Doppelaufgabe mit gestörter Propriozeption verändert, ob bei gleichbleibender Einzelaufgaben-Kurve nur die Doppelaufgaben-Werte erhöht sind und ob sich ein spezifisches Muster im Zeitverlauf des Ressourcenbedarfs zeigt. Es ist möglich, dass auf Grund der gestörten Propriozeption vermehrt kognitive Ressourcen bei der Bewegungsausführung beansprucht werden, da sich ändernde Bedingungen nicht durch die propriozeptive Rückmeldung direkt zu einer Anpassung führen (wie z. B. beim Gehen auf unebenen Bö-

den), sondern ständige Aufmerksamkeit und visuelle Kontrolle erfordern. Wenn diese Annahme zutrifft, müsste sich in einer Doppelaufgabe mit verschiedenen Reaktionsaufgaben ein Unterschied zwischen den Ergebnissen der Adaptation mit und ohne Vibration zeigen. In ihrer Studie mit einem deafferentierten Probanden und mehreren Kontrollprobanden im Jahr 2000 führten Ingram et al. nicht nur Einzelaufgaben, sondern auch Doppelaufgaben durch. Die Lernaufgabe bestand aus der Adaptation von Armbewegungen an verschiedene Änderungen des Verhältnisses von Arm- zu Fadenkreuzbewegungen. Als Zweitaufgabe mussten die Probanden in vorgegebenen Schritten rückwärts zählen. Die Adaptation an die Lernaufgabe war durch diese kognitive Zusatzaufgabe bei allen Probanden verschlechtert, bei dem deafferentierten Patienten sogar fast nicht mehr vorhanden. Zwar sind die Ergebnisse von Studien mit deafferentierten Patienten, wie in der Einleitung beschrieben, nicht auf gesunde Menschen übertragbar, dennoch kann das Ergebnis einen Hinweis darauf geben, dass in einer Doppelaufgaben-Studie mit bilateraler Vibration Effekte zu finden sind. Eine solche Studie, die auf Grund mehrerer Testgruppen eine hohe Probandenanzahl erfordert, sollte aus den genannten Gründen von einem einzigen Versuchsleiter durchgeführt werden. Die Ergebnisse könnten dann gleichzeitig Aufschluss über die Existenz eines für verschiedene Reaktionsaufgaben spezifischen Musters des Ressourcenbedarfs in der Kontrollgruppe, also mit normaler Propriozeption, geben und damit entweder die Ergebnisse von Eversheim und Bock (2001) oder die dieser Arbeit bestätigen.

Abschließend kann festgestellt werden, dass diese Arbeit bzgl. der Rolle der Kognition bei der sensomotorischen Adaptation einen vermehrten Ressourcenbedarf zu Beginn einer Adaptationsphase bestätigte. Allerdings konnte kein spezifisches sich während der Adaptation änderndes Muster gefunden werden. In der Adaptationsphase ergab sich darüber hinaus ein Einfluss der Ausgangsmodalitäten zweier Aufgaben und eine Erhöhung des Bedarfs an Ressourcen für die Antwortvorbereitung. Bezüglich der Rolle der Propriozeption zeigte sich, dass sie bei verschiedenen Störungsnaturen unterschiedlich ist. Es ergab sich nur bei einer nicht-positionsabhängigen mechanischen Störung eine Verschlechterung der Adaptation bei gestörter Propriozeption.



### 3.2 Kritische Betrachtung der Methodik

In allen Adaptationsexperimenten führten die benutzten Transformationen zu Adaptationskurven, wie sie aus früheren Studien bekannt sind. Die Experimente waren demnach geeignet, um aussagekräftige Ergebnisse über die Adaptation zu erzielen. Dennoch gab es einige Kritikpunkte, die bei zukünftigen Arbeiten zu beachten sind.

Die lange Testdauer einiger Experimente könnte zu Konzentrations- und Motivationsproblemen geführt haben, so dass der Plateauwert einiger Adaptationskurven eventuell höher ist, als er im ausgeruhten Zustand wäre. Laut der Aussage vieler Probanden war die Rückmeldung über den Fehler der vorangegangenen Episode zwar motivierend, jedoch reichte das bei einer zu langen Testdauer als Motivation nicht aus. Weiterhin ist zu bemerken, dass diese Rückmeldung nur den Fehlerwinkel angab, nicht aber z. B. die Treffgenauigkeit. Über die in Experiment B zusätzlich untersuchten Variablen erhielt der Proband somit keine Rückmeldung, so dass während des Experiments keine Möglichkeit zur Kontrolle der Adaptation bestand.

Darüber hinaus war die Probandenanzahl mit teilweise nur sechs Probanden zwar ein richtungsweisender Anfang, doch sollten die statistischen Ergebnisse mit der entsprechenden Vorsicht betrachtet werden. Es ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass fast alle Probanden Sportstudenten waren, bei denen die Vorerfahrungen im Bereich des motorischen Lernens größer sind als beim Durchschnitt der Gesamtbevölkerung.

Wie in der experimentübergreifenden Methodik beschrieben wurde, bestimmten die Auswertungsprogramme Start- und Endpunkt der Hinbewegung an Hand der Schwelle der Bewegungsgeschwindigkeit von 32 mm/s. Hierbei handelt es sich um einen Erfahrungswert aus früheren Studien. Für den Startpunkt war diese Schwelle angemessen, doch das Ende der Bewegung sollte mit einem getrennten Wert bestimmt werden, da es bei der Auswertung häufig manuell verbessert werden musste. Vor allem in Experimenten mit mechanischen Störungen müsste nach den Erfahrungen dieser Arbeit dieser Wert höher liegen, damit nicht so häufig nachkorrigiert werden muss.

Der Zeitpunkt des ersten Geschwindigkeitsmaximums war zwar ein ausreichender Bestimmungspunkt für den initialen Richtungsfehler, doch in zukünftigen Experimen-

ten wäre der Zeitpunkt 100 ms nach Bewegungsstart sinnvoll, da dieser Punkt für alle zeitgleich und somit eindeutig definiert ist. In dem letzten Experiment dieser Arbeit wurden zur Kontrolle beide Fehlerwerte, zum Zeitpunkt des ersten Geschwindigkeitsmaximums und zum Zeitpunkt von 100 ms, bestimmt. Es ergab sich eine vergleichbare Kurve für den initialen Richtungsfehler, so dass die bisherigen Ergebnisse durch diese Überlegungen weder an Gültigkeit noch an Aussagekraft verlieren.

Bei den Doppelaufgaben-Experimenten musste für die Einzelaufgaben-Werte aller Probanden eine Anpassungskurve gefunden werden. Trotz vieler Versuche wurde nicht für jeden Probanden eine perfekte Anpassungsfunktion für alle Episoden gefunden. Dadurch können bei der  $\Delta$ RMS- und  $\Delta$ Zeigefehler-Berechnung zu hohe oder zu niedrige Werte entstanden sein. Auch wenn dadurch kein anderes Muster des Ressourcenbedarfs erwartet wird, wäre es für zukünftige Arbeiten sinnvoll, diese Art der Berechnung der  $\Delta$ RMS- und  $\Delta$ Zeigefehler zu hinterfragen. Ein nützlicher Hinweis ist eventuell die Beachtung der Episodenlänge. Die Anpassungskurven des zweiten Doppelaufgaben-Experiments, in dem die Episoden kürzer waren als im ersten, waren genauer, da die einzelnen Datenpunkte näher beieinander lagen und den Lernfortschritt besser dokumentierten. Darüber hinaus scheint bei Doppelaufgaben-Experimenten der Versuchsleiter Einfluss auf die Ergebnisse zu haben. Um Auswirkungen auf Grund unterschiedlicher Anweisungen vor und während des Experiments zu vermeiden, sollten sie bei zukünftigen Experimenten, wie bereits erwähnt, schriftlich oder akustisch per Tonträger gegeben werden.

### 3.3 Praktische Relevanz

Die praktische Relevanz der verschiedenen gezeigten Eigenschaften der sensomotorischen Adaptation, wie z. B. die Fähigkeit zur Adaptation und zur Retention, ist groß. In vielen Situationen im täglichen Leben ist es nötig, sich an neue Situationen anpassen zu können. Außerdem ist die Fähigkeit, einen gelernten Zustand nach langer Zeit wieder nutzen zu können, wie z. B. das Radfahren, das man sprichwörtlich nicht verlernt, sehr wichtig, damit wir nicht alles neu erlernen müssen. Ruft man nach vielen Jahren früher gelernte Fähigkeiten ab, kann es zwar zu geringen Einbußen kommen (auch in der Retentionsphase der Adaptationsstudien dieser Arbeit zeigte sich keine

100%ige Bewahrung), doch das Bewegungsmuster an sich wird nicht verlernt, nur die Feinabstimmung muss aufgefrischt werden. Für den Sport, aber auch für viele andere Bewegungen, ist die Komposition, also das Zusammenbauen verschiedener gelernter Teilbewegungen, von großer Bedeutung. Zwar ist es nicht sinnvoll, nur isolierte Teilbewegungen zu lernen und diese zusammenzubauen, doch kann die Fähigkeit zum Zusammensetzen dort genutzt werden, wo eine Bewegung zu komplex ist, als dass sie problemlos in einem Schritt gelernt werden könnte.

Die Ergebnisse des ersten Vorexperiments zeigen, dass Bewegungen mit der Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn mit visueller Rückmeldung genauer sind als im Uhrzeigersinn. In Istanbul wurde die Formel 1 Rennstrecke zum ersten Mal gegen den Uhrzeigersinn genutzt. Mit Blick auf die beschriebenen Ergebnisse könnte es sinnvoll sein, diese Drehrichtung häufiger zu nutzen, da sie scheinbar genauere Bewegungen zur Folge hat. Abgesehen davon, dass sich die Fahrer umstellen müssten und sich eventuell auch die Belastung für die Autos ändert, könnte die Formel 1 so sicherer werden.

Praktische Bedeutung haben auch die Ergebnisse über die Rolle der Propriozeption. Wie Ghez et al. (1990) aussagten, ist die propriozeptive Rückmeldung wichtig, um eine stabile Handposition halten zu können. Auch wenn sich in dem Experiment mit einer visuellen Störung kein Einfluss der Vibration zeigte, weisen die Ergebnisse der Experimente E und G dieser Arbeit darauf hin, dass die Propriozeption für genaue und kontrollierte Bewegungen wichtig ist. Auf dieser Annahme beruht die Erklärung der Wirkweise von Tape-Verbänden. Diese sprechen bei Bewegung durch Zug und Druck sowohl die Rezeptoren in der Dermis als auch die Muskel- und Sehnenspindeln an und verstärken dadurch die propriozeptiven Signale. Diese Erhöhung der propriozeptiven Informationen führt dazu, dass „eine aktive Schutzwirkung auf die Funktionseinheit erzielt“ wird (Montag und Asmussen 2003, S. 17). Die Ergebnisse der vorliegenden Vibrationsexperimente können auch in der Rehabilitation genutzt werden: Zum einen zeigen sie, dass eine propriozeptive Rehabilitation sinnvoll ist, da durch die Verstärkung der Propriozeption kontrolliertere und genauere Bewegungen möglich sind, zum anderen könnte die Propriozeption durch Vibration beeinflusst werden, wenn sie beim Erreichen bestimmter Rehabilitationsziele stört. Auch in der Luft- und Raumfahrt ist die Auswirkung von Vibration auf die Propriozeption bei der

Bauweise von z. B. Steuerknüppeln wichtig, da die Piloten bei der Steuerung eines Flugzeugs häufig großen Vibrationen ausgesetzt sind und dennoch genaue Bewegungen ausführen müssen.

## 4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Aspekte der sensomotorischen Adaptation untersucht, vor allem die Rolle der Kognition und der Propriozeption.

Zwei Vorexperimente schafften zunächst wichtige Grundlagen für die folgenden Experimente: Zum einen sollte eine geeignete Verteilung von Zielpunkten bei Experimenten mit Zeigebewegungen gefunden und zum anderen die Wirkung eines elastischen Stabes als mechanische Störung erprobt werden. Anschließend wurde die Rolle der Kognition bei der sensomotorischen Adaptation mit Hilfe der Doppelaufgaben-Methode unter Benutzung verschiedener Reaktionsaufgaben als Zweitaufgabe hinterfragt. In den letzten drei Experimenten dieser Arbeit wurde mit Vibration gearbeitet. Dabei wurde zuerst die Wirkung eines Vibrationsaufbaus auf die Propriozeption und danach die Rolle der Propriozeption bei der Adaptation an eine visuelle und eine mechanische Störung untersucht.

Die Ergebnisse der durchgeführten Experimente lassen folgende Rückschlüsse auf die sensomotorische Adaptation zu: Bei der Adaptation an Rotationen der visuellen Rückmeldung und deren Transfer auf ungeübte Bewegungsrichtungen spielt die Anzahl der Ziele bei Zeigebewegungen eine wichtigere Rolle als deren Verteilung im Arbeitsraum. Außerdem führt eine Rotation der visuellen Rückmeldung im Uhrzeigersinn verglichen mit der entgegen dem Uhrzeigersinn zu einer vollständigeren Adaptation und Retention sowie zu einem besseren Transfer. Weiterhin wurde in dieser Arbeit deutlich, dass ein elastischer Stab keine geeignete mechanische Störung für Adaptationsexperimente darstellt, da keine Variable gefunden werden konnte, für die eine typische Adaptationskurve die Anpassung an die wirkende Rückstellkraft beschreibt. Die Experimente, in denen die Doppelaufgaben-Methode benutzt wurde, zeigten einen erhöhten Bedarf an Ressourcen zu Beginn einer Adaptationsphase sowohl für Folge- als auch für Zeigebewegungen. Sie gaben jedoch keinen Hinweis auf einen sich ändernden Bedarf verschiedener Ressourcen im Verlauf eines solchen Adaptationsprozesses. Allerdings wurde ein genereller Einfluss der Ähnlichkeit der Ausgangsmodalitäten und der Anzahl an Antwortmöglichkeiten deutlich, der erst mit Beginn der Adaptationsphase auftrat. In den Experimenten, mit denen die Rolle der Propriozeption untersucht werden sollte, wurde mit einem Vibrationsaufbau gearbei-

tet. Es zeigte sich, dass hierdurch die Propriozeption gestört werden kann. Während bei der Adaptation, der Retention und der Deadaptation in Folge einer Rotation der visuellen Rückmeldung die gestörte Propriozeption keinen Einfluss hat, wurde bei einer geschwindigkeitsabhängigen mechanischen Störung sowohl die Adaptation als auch die Retention verlangsamt und sogar unvollständig. Diese Ergebnisse geben einen Hinweis darauf, dass der Adaptation an die beiden benutzten Störungen zumindest teilweise unterschiedlichen Mechanismen zu Grunde liegen.

Bezüglich der Rolle der Kognition bestätigen die Ergebnisse dieser Arbeit einen zu Beginn der Adaptationsphase erhöhten Ressourcenbedarf. Jedoch konnte weder für die Folge- noch für die Zeigebewegungen ein spezifisches, sich während der Adaptation änderndes Muster festgestellt werden. Bezüglich der Rolle der Propriozeption ergibt sich, dass diese für die vollständige Adaptation an mechanische Störungen von Bedeutung ist, jedoch keinen Einfluss auf die Adaptation an visuelle Störungen hat.

## 5 Literaturverzeichnis

- Abeelee S, Bock O (2001a) Mechanisms for sensorimotor adaptation to rotated visual input. *Exp Brain Res* 139: 248-253
- Abeelee S, Bock O (2001b) Sensorimotor adaptation to rotated visual input: different mechanisms for small versus large rotations. *Exp Brain Res* 140: 407-410
- Abeelee S, Bock O (2003) Transfer of sensorimotor adaptation between different movement categories. *Exp Brain Res* 148: 128-132
- Adams JA (1971) A closed-loop theory of motor learning. *J Mot Behav* 3: 111-149
- Anderson JR (1982) Acquisition of cognitive skill. *Psychol Rev* 89: 369-406
- Barrick HP, Shelly C (1958) Time sharing as an index of automatization. *J Exp Psychol* 56: 288-293
- Bard C, Fleury M, Teasdale N, Paillard J, Nougier V (1995) Contribution of proprioception for calibrating and updating the motor space. *Can J Physiol Pharmacol* 73: 246-254
- Bock O (1992) Adaptation of aimed arm movements to sensorimotor discordance: evidence for direction-independent gain control. *Behav Brain Res* 51: 41-50
- Bock O (1993) Early stages of load compensation in human aimed arm movements. *Behav Brain Res* 55: 61-68
- Bock O (2001) Mechanismen der sensomotorischen Adaptation beim Menschen. *Dt Z Sportmed* 52: 6-10
- Bock O (2003) Sensorimotor adaptation to visual distortions with different kinematic coupling. *Exp Brain Res* 151: 557-560
- Bock O (2005) Components of sensorimotor adaptation in young and elderly subjects. *Exp Brain Res* 160: 259-263
- Bock O, Abeelee S, Eversheim U (2003) Human adaptation to rotated vision: interplay of a continuous and a discrete process. *Exp Brain Res* 152:528-532
- Bock O, Burghoff M (1997) Visuo-motor adaptation: evidence for a distributed amplitude control system. *Behav Brain Res* 89: 267-273
- Bock O, Schneider S, Bloomberg J (2001) Conditions for interference versus facilitation during sequential sensorimotor adaptation. *Exp Brain Res* 138: 359-365
- Bock O, Thomas M, Grigorova V (2005a) The effect of rest breaks on human sensorimotor adaptation. *Exp Brain Res* 163: 258-260

- Bock O, Vercher JL, Gauthier G (2005b) Wrist vibration affects the production of finely graded forces. *Aviat Space Environ Med* 76: 435-440
- Bock O, Worringham C, Thomas M (2005c) Concurrent adaptations of left and right arms to opposite visual distortions. *Exp Brain Res* 162: 513-519
- Bourdin C, Gauthier G, Blouin J, Vercher JL (2001) Visual feedback of the moving arm allows complete adaptation of pointing movements to centrifugal and Coriolis forces in human subjects. *Neurosci Lett* 301: 25-28
- Brashers-Krug T, Shadmehr R, Bizzi E (1996) Consolidation in human motor memory. *Nature* 382: 252-255
- Broadbent D (1958) *Perception and Communication*. Pergamon Press, New York
- Clower DM, Boussaoud D (2000) Selective use of perceptual recalibration versus visuomotor skill acquisition. *J Neurophysiol* 84: 2703-2708
- Cole, JD (1995) *Pride and a Daily Marathon*. MIT Press, Cambridge, MA
- Cole JD, Sedgwick EM (1992) The perceptions of force and of movement in a man without large myelinated sensory afferents below the neck. *J Physiol* 449: 503-515
- Criscimagna-Hemminger SE, Donchin O, Gazzaniga MS, Shadmehr R (2003) Learned dynamics of reaching movements generalize from dominant to nondominant arm. *J Neurophysiol* 89: 168-176
- Damos DL (1985) The effect of asymmetric transfer and speech technology on dual-task performance. *Hum Factors* 27: 409-421
- Dinse HR, Kalisch T, Ragert P, Pleger B, Schwenkreis P, Tegenthoff M (2005) Improving Human Haptic Performance in Normal and Impaired Human Populations through Unattended Activation-Based Learning. *Journal of applied Psychology* 2: 71-88
- Eversheim U (2002) *Kognitive Beanspruchung motorischen Lernens: Untersuchungen mit Hilfe der Doppeltätigkeits-Methodik*. Diss. Deutsche Sporthochschule Köln
- Eversheim U, Bock O (2001) Evidence for processing stages in skill acquisition: a dual-task study. *Learn Mem* 8: 183-189
- Fitts PM (1964) Perceptual-motor skill learning. In: Melton AW (Hrsg) *Categories of Human Learning*. Academic Press, New York, S. 243-285
- Flanagan JR, Nakano E, Imamizu H, Osu R, Yoshioka T, Kawato M (1999) Composition and decomposition of internal models in motor learning under altered kinematic and dynamic environments. *J Neurosci* 19: RC34: 1-5
- Gandolfo F, Mussa-Ivaldi FA, Bizzi E (1996) Motor learning by field approximation. *Proc Natl Acad Sci* 93: 3843-3846



- Ghez C, Gordon J, Ghilardi MF, Christakos CN, Cooper SE (1990) Roles of proprioceptive input in the programming of arm trajectories. *Cold Spring Harb Symp Quant Biol* 55: 837-847
- Gilhodes JC, Roll JP, Tardy-Gervet MF (1986) Perceptual and motor effects of agonist-antagonist muscle vibration in man. *Exp Brain Res* 61: 395-402
- Goodbody SJ, Wolpert DM (1998) Temporal and amplitude generalization in motor learning. *J Neurophysiol* 79: 1825-1838
- Goodman D, Kelso JA (1980) Are movements prepared in parts? Not under compatible (naturalized) conditions. *J Exp Psychol Gen* 109: 475-495
- Goodwin GM, McCloskey DI, Matthews PB (1972) The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain* 95: 705-748
- Guedon O, Gauthier G, Cole J, Vercher JL, Blouin J (1998) Adaptation in visuomanual tracking depends on intact proprioception. *J Mot Behav* 30: 234-248
- Hamilton CR (1964) Intermanual Transfer of Adaptation to Prisms. *Am J Psychol* 77: 457-462
- Harlow HF (1949) The formation of learning sets. *Psychol Rev* 56: 51-65
- Hay JC, Pick HJJ, Ikeda K (1965) Visual capture produced by prism spectacles. *Psychon. Sci.* 2: 215-216
- Hazeltine E, Grafton ST, Ivry R (1997) Attention and stimulus characteristics determine the locus of motor-sequence encoding. A PET study. *Brain* 120: 123-140
- Hazeltine E, Teague D, Ivry RB (2002) Simultaneous dual-task performed reveals parallel response selection after practice. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 28: 527-545
- Henry FM, Rogers DE (1960) Increased response latency for complicated movements and a memory drum theory of neuromotor reaction. *Res Quart* 31: 448-458
- Heuer H (1984) Motor learning as a process of structural constriction and displacement. In: Prinz W, Sanders AF (Hrsg) *Cognition and Motor Processes*. Springer-Verlag, Berlin, S. 295-305
- Hick WE (1952) On the rate of gain of information. *Quart J Exp Psychol* 4: 11-26
- Huynh H, Feldt LS (1970) Conditions under which mean square ratios in repeated measures designs have exact F-distributions. *J Am Stat Ass* 65: 1582-1589
- Imamizu H, Miyauchi S, Tamada T, Sasaki Y, Takino R, Putz B, Yoshioka T, Kawato M (2000) Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool. *Nature* 403: 192-195

- Imamizu H, Shimojo S (1995) The locus of visual-motor learning at the task or manipulator level: implications from intermanual transfer. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 21: 719-733
- Ingram HA, van Donkelaar P, Cole J, Vercher JL, Gauthier GM, Miall RC (2000) The role of proprioception and attention in a visuomotor adaptation task. *Exp Brain Res* 132: 114-126
- Ito M (2000) Neurobiology: internal model visualized. *Nature* 403: 153-154
- Kahneman D (1973) *Attention and Effort*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ
- Keele SW, Posner MI (1968) Processing of visual feedback in rapid movements. *J Exp Psychol* 77: 155-158
- Kelso J (1984) Phase transition and critical behavior in human bimanual coordination. *Am J Physiol* 15: 1000-1004
- Kitazawa S, Kimura T, Uka T (1997) Prism adaptation of reaching movements: specificity for the velocity of reaching. *J Neurosci* 17: 1481-1492
- Klapp ST, Kelly PA, Netick A (1987) Hesitations in continuous tracking induced by a concurrent discrete task. *Hum Factors* 29: 327-337
- Kohler (1964) *The Formation and Transformation of the Perceptual World*. International Universities Press, Inc., New York
- Krakauer JW, Ghilardi MF, Ghez C (1999) Independent learning of internal models for kinematic and dynamic control of reaching. *Nat Neurosci* 2: 1026-1031
- Krakauer JW, Pine ZM, Ghilardi MF, Ghez C (2000) Learning of visuomotor transformations for vectorial planning of reaching trajectories. *J Neurosci* 20: 8916-8924
- Kravitz JH, Wallach H (1966) Adaptation to displaced vision contingent upon vibrating stimulation. *Psychon. Sci.* 6: 465-466
- Kropp P (1992) *Experimentelle Untersuchungen zum motorischen Lernen*. Peter Lang, Frankfurt am Main
- Lackner JR, DiZio P (1994) Rapid adaptation to Coriolis force perturbations of arm trajectory. *J Neurophysiol* 72: 299-313
- Lajoie Y, Paillard J, Teasdale N, Bard C, Fleury M, Forget R, Lamarre Y (1992) Mirror drawing in a deafferented patient and normal subject: visuoproprioceptive conflict. *Neurology* 42: 1104-1106
- Lazar G, van Laer J (1968) Adaptation to displaced vision after experience with lesser displacements. *Percept Mot Skills* 26: 579-582
- Leonard CT (1998) *The Neuroscience of Human Movement*. St. Louis, Mosby-Year Book

- Lintern G, Wickens D (1991) Issues for acquisition and transfer of timesharing and dual-task skills. In: D. Damos (Hrsg.) Multiple Task Performance. Taler & Francis Ltd., Bristol, S. 123-138
- Logie (1989) Working memory in the acquisition of complex cognitive skills. *Acta Psychol* 71:53-87
- Magill RA (2001) Motor Learning - Concepts and Applications. McGraw-Hill, New York
- Malfait N, Shiller DM, Ostry DJ (2002) Transfer of motor learning across arm configurations. *J Neurosci* 22: 9656-9660
- Manzey D (1993) Doppelaufgabeninterferenz: Neue theoretische und methodische Perspektiven für ein altes Paradigma. In: Daugs R, Blischke K (Hrsg.) Aufmerksamkeit und Automatisierung in der Sportmotorik. Academia Verlag, St. Augustin, S. 79-96
- Marsh AP, Geel SE (2000) The effect of age on the attentional demands of postural control. *Gait Posture* 12: 105-113
- Mather J, Lackner J (1975) Adaptation to visual rearrangement elicited by tonic vibration reflexes. *Exp Brain Res* 24: 103-105
- McGaugh JL (1966) Time-dependent processes in memory storage. *Science* 153: 1351-1358
- McLeod PD (1973) Interference of "attend to and learn" tasks with tracking. *J Exp Psychol* 99: 330-333
- McNay EC, Willingham DB (1998) Deficit in learning of a motor skill requiring strategy, but not of perceptuomotor recalibration, with aging. *Learn Mem* 4: 411-420
- Meinel K, Schnabel G (1998) Bewegungslehre Sportmotorik. Sport Verlag Berlin
- Mohnkopf W (1933) Zur Automatisierung willkürlicher Bewegungen. *Z Psychol* 130: 235-299
- Montag H-J, Asmussen PD (2003) Taping Seminar. Spitta, Balingen
- Murphy TD, Eriksen CW (1987) Temporal changes in the distribution of attention in the visual field in response to precues. *Percept Psychophys* 42: 576-586
- Navon D, Gopher D (1979) On the economy of the human-processing system. *Psychol Rev* 86: 214-255
- Nissen MJ, Bullemer P (1987) Attentional requirements of learning: evidence from performance measures. *Cognit Psychol* 19: 1-32
- Noble M, Trumbo D, Fowler F (1967) Further evidence on secondary task interference in tracking. *J Exp Psychol* 73: 146-149

- Norman DA, Bobrow DG (1975) On data-limited and resource-limited processes. *Cognit Psychol* 7: 44-64
- Pew RW (1966) Acquisition of hierarchical control over the temporal organization of a skill. *J Exp Psychol* 71: 764-771
- Pine ZM, Krakauer JW, Gordon J, Ghez C (1996) Learning of scaling factors and reference axes for reaching movements. *Neuroreport* 7: 2357-2361
- Pöhlmann R (1994) *Motorisches Lernen, Bewegungsregulation - Psychomotorik - Rehabilitation*. Rowohlt, Reinbek
- Polit A, Bizzi E (1979) Characteristics of motor programs underlying arm movements in monkeys. *J Neurophysiol* 42: 183-194
- Posner MI (1980) Orienting of attention. *Quart J Exp Psychol* 32: 3-25
- Rao AK, Gordon AM (2001) Contribution of tactile information to accuracy in pointing movements. *Exp Brain Res* 138: 438-445
- Redding GM, Wallace B (1996) Adaptive spatial alignment and strategic perceptual-motor control. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 22: 379-394
- Roby-Brami A, Burnod Y (1995) Learning a new visuomotor transformation: error correction and generalization. *Brain Res Cogn Brain Res* 2: 229-242
- Roll JP, Vedel JP, Ribot E (1989) Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study. *Exp Brain Res* 76: 213-222
- Ruthruff E, Hazeltine E, Remington RW (2005) What causes residual dual-task interference after practice? *Psychol Res*: 1-10
- Ruthruff E, Pashler HE, Hazeltine E (2003) Dual-task interference with equal task emphasis: graded capacity sharing or central postponement? *Percept Psychophys* 65: 801-816
- Sainburg RL, Ghilardi MF, Poizner H, Ghez C (1995) Control of limb dynamics in normal subjects and patients without proprioception. *J Neurophysiol* 73: 820-835
- Sainburg RL, Wang J (2002) Interlimb transfer of visuomotor rotations: independence of direction and final position information. *Exp Brain Res* 145: 437-447
- Scheidt RA, Conditt MA, Secco EL, Mussa-Ivaldi FA (2005) Interaction of visual and proprioceptive feedback during adaptation of human reaching movements. *J Neurophysiol* 93: 3200-3213
- Schmidt RA (1976) Control processes in motor skills. *Exerc Sport Sci Rev* 4: 229-261
- Schmidt RA (1991) *Motor Learning and Performance*. Human Kinetics Books, Champaign

- Schmidt RA, Lee TD (1999) Motor Control and Learning - A Behavioral Emphasis. Human Kinetics, Champaign IL
- Schneider W, Shiffrin RM (1977) Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search and attention. *Psychol Rev* 84: 1-66
- Seidler RD, Bloomberg JJ, Stelmach GE (2001) Context-dependent arm pointing adaptation. *Behav Brain Res* 119: 155-166
- Seitz RJ, Roland E, Bohm C, Greitz T, Stone-Elander S (1990) Motor learning in man: a positron emission tomographic study. *Neuroreport* 1: 57-60
- Shadmehr R, Brashers-Krug T (1997) Functional stages in the formation of human long-term motor memory. *J Neurosci* 17: 409-419
- Shadmehr R, Holcomb HH (1997) Neural correlates of motor memory consolidation. *Science* 277: 821-825
- Shadmehr R, Moussavi ZM (2000) Spatial generalization from learning dynamics of reaching movements. *J Neurosci* 20: 7807-7815
- Shadmehr R, Mussa-Ivaldi FA (1994) Adaptive representation of dynamics during learning of a motor task. *J Neurosci* 14: 3208-3224
- Shiffrin RM, Schneider W (1977) Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending, and a general theory. *Psychol Rev* 84: 127-190
- Spanos NP, Saad CL (1984) Prism adaptation in hypnotically limb-anesthetized subjects: more disconfirming data. *Percept Mot Skills* 59: 379-386
- Stratton GM (1897) Vision without inversion of the retinal image. *Psychol Rev* 4: 341-481
- Swinnen SP, Walter CB (1991) Toward a movement dynamics perspective on dual-task performance. *Hum Factors* 33: 367-387
- Swinnen SP, Young DE, Walter CB, Serrien DJ (1991) Control of asymmetrical bimanual movements. *Experimental Brain Research* 85: 163-173
- Taub E, Goldberg IA (1974) Use of sensory recombination and somatosensory deafferentation techniques in the investigation of sensory-motor integration. *Perception* 3: 393-405
- Taub E, Goldberg IA, Taub P (1975) Deafferentation in monkeys: pointing at a target without visual feedback. *Exp Neurol* 46: 178-186
- Tong C, Flanagan JR (2003) Task-specific internal models for kinematic transformations. *J Neurophysiol* 90: 578-585

- Tong C, Wolpert DM, Flanagan JR (2002) Kinematics and dynamics are not represented independently in motor working memory: evidence from an interference study. *J Neurosci* 22: 1108-1113
- Van Beers RJ, Wolpert DM, Haggard P (2002) When feeling is more important than seeing in sensorimotor adaptation. *Curr Biol* 12: 834-837
- Vercher JL, Sares F, Blouin J, Bourdin C, Gauthier G (2003) Role of sensory information in updating internal models of the effector during arm tracking. *Progr Brain Res* 142: 203-222
- Vuillerme N, Danion F, Forestier N, Nougier V (2002) Postural sway under muscle vibration and muscle fatigue in humans. *Neurosci Lett* 333: 131-135
- Wallace B, Garrett J (1973) Reduced felt arm sensation effects on visual adaptation. *Percept & Psychophys* 14: 597-600
- Wang J, Sainburg RL (2004) Limitations in interlimb transfer of visuomotor rotations. *Exp Brain Res* 155: 1-8
- Wickens CD (1980) The structure of attentional resources. In: Nickerson RS (Hrsg.) *Attention and Performance VIII*. Erlbaum, Hillsdale, NJ, S. 339-257
- Wickens CD (1984) Processing resources in attention. In: Parasuramam R, Davies R (Hrsg.) *Varieties of Attention*. Academic Press, New York, S. 63-101
- Wicker P (2005) Experimentelle Untersuchung zum Zusammenhang zwischen mentaler Rotation und sensomotorischer Adaptation. Diplomarbeit Deutsche Sporthochschule Köln
- Wigmore V, Tong C, Flanagan JR (2002) Visuomotor rotations of varying size and direction compete for a single internal model in motor working memory. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 28: 447-457
- Willingham DB, Greenberg AR, Thomas RC (1997) Response-to-stimulus interval does not affect implicit motor sequence learning, but does affect performance. *Mem Cognit* 25: 534-542
- Wolff PH, Cohen C (1980) Dual task performance during bimanual coordination. *Cortex* 16: 119-133
- Wolpert DM, Ghahramani Z, Jordan MI (1995) An internal model for sensorimotor integration. *Science* 269: 1880-1882

## 6 Anhang

### Anhang A

#### Initialer Zeigefehler

Gruppe Episode	A		B		C		D	
	MWT	STA	MWT	STA	MWT	STA	MWT	STA
1	1.6	1.6	-1.2	3.6	0.0	3.3	3.6	2.1
2	1.6	3.3	-0.3	1.6	0.9	4.4	2.9	1.3
3	2.3	3.5	-0.4	1.4	2.6	4.5	3.5	3.3
4	1.6	2.0	-0.8	1.2	1.2	5.2	3.3	1.3
5	1.9	1.6	-0.3	0.8	-0.2	2.7	2.0	1.0
6	0.1	2.2	-1.0	1.6	0.7	2.3	2.7	1.2
7	36.3	3.0	36.0	4.9	34.4	4.7	42.1	4.5
8	24.7	6.7	29.2	8.2	23.2	7.8	30.3	14.5
9	19.0	6.1	27.6	11.0	16.4	8.8	21.5	16.4
10	12.8	7.1	22.9	11.6	12.9	8.0	6.1	18.6
11	8.8	7.5	20.1	9.8	11.7	5.2	11.0	12.8
12	8.2	6.1	16.6	11.1	7.2	3.4	9.5	11.3
13	7.3	4.7	15.1	10.2	5.4	3.6	11.5	9.3
14	4.7	3.7	13.0	5.9	4.5	2.7	8.4	1.2
15	5.2	2.3	11.0	4.7	4.8	1.5	6.7	3.9
16	5.9	3.6	9.2	5.9	3.6	1.2	4.5	3.1
17	4.9	2.7	8.3	1.4	4.4	1.8	6.8	2.5
18	3.9	1.2	9.7	4.1	4.4	1.4	6.2	2.3
19	2.2	2.1	8.2	6.2	3.6	2.5	6.6	1.9
20	3.8	2.3	7.4	5.3	4.3	1.9	6.1	3.4
21	2.9	1.5	7.2	5.3	3.5	1.6	4.9	3.4
22	2.4	2.6	8.1	5.4	2.5	1.6	5.0	3.0
23	2.7	2.6	6.8	3.9	2.3	1.6	4.8	2.0
24	1.0	2.4	7.1	3.1	2.5	1.6	3.8	3.8
25	2.9	1.9	5.0	1.8	2.7	1.8	4.9	2.8
26	1.2	1.2	4.3	2.7	2.2	1.3	3.7	2.7
27	1.2	2.3	3.8	2.7	1.9	1.9	3.7	2.8
28	1.8	1.5	2.2	3.6	2.0	2.2	4.1	2.0

<b>29</b>	0.6	2.4	5.1	2.6	1.6	1.2	3.6	2.5
<b>30</b>	1.1	1.3	6.1	2.5	1.9	2.9	3.8	1.3
<b>31</b>	0.1	2.1	5.6	1.9	1.3	1.3	2.4	1.7
<b>32</b>	0.7	1.1	4.1	1.9	2.7	1.3	4.0	2.8
<b>33</b>	1.0	3.1	3.6	2.2	1.8	1.9	3.3	1.7
<b>34</b>	0.1	1.1	3.5	3.6	1.7	0.6	3.5	3.1
<b>35</b>	0.6	1.7	3.5	1.4	1.2	2.4	2.9	3.5
<b>36</b>	0.3	1.2	2.8	3.5	0.2	1.1	3.0	1.4
<b>37</b>	7.9	2.8	7.6	5.1	10.2	2.6	5.4	6.4
<b>38</b>	12.0	4.8	11.2	10.8	10.5	6.8	9.5	8.4
<b>39</b>	14.4	2.9	15.2	13.7	10.8	6.0	8.5	8.3
<b>40</b>	5.6	2.5	5.2	4.7	4.5	2.3	5.1	2.3
<b>41</b>	1.0	1.7	3.7	2.3	1.3	1.9	1.8	1.9
<b>42</b>	0.0	0.9	2.0	2.6	1.7	1.7	1.6	1.9
<b>43</b>	5.5	6.4	9.8	4.0	3.5	3.3	3.7	5.2
<b>44</b>	1.0	2.3	3.6	2.3	1.9	1.6	0.4	1.6
<b>45</b>	2.4	1.6	3.4	0.9	1.6	1.5	3.2	1.6
<b>46</b>	3.2	6.5	4.2	0.9	1.6	1.2	2.0	1.8
<b>47</b>	0.9	2.6	2.6	3.0	1.8	1.4	3.2	2.3
<b>48</b>	1.9	2.1	3.9	3.4	1.5	0.9	2.5	1.7
<b>49</b>	1.9	1.2	3.1	3.0	1.8	1.5	2.9	0.9
<b>50</b>	1.3	0.9	4.5	2.7	0.9	1.1	2.3	3.2
<b>51</b>	0.7	0.9	4.4	1.3	2.8	1.2	2.7	2.2
<b>52</b>	1.1	2.2	2.9	2.7	1.0	1.8	2.1	2.9
<b>53</b>	10.0	5.7	20.7	8.3	7.5	1.8	19.0	11.0
<b>54</b>	5.9	4.0	10.6	4.7	1.3	1.6	6.3	6.6
<b>55</b>	4.2	2.9	8.4	5.3	1.7	1.9	5.1	4.5
<b>56</b>	6.1	4.6	7.1	6.4	1.2	2.1	2.7	3.7
<b>57</b>	4.8	3.1	7.9	6.1	1.7	2.4	5.5	2.0
<b>58</b>	4.8	2.1	7.2	4.4	1.0	1.9	3.6	2.8
<b>59</b>	3.4	1.9	5.7	2.9	2.1	1.9	3.9	3.2
<b>60</b>	3.1	1.8	6.2	3.7	-0.1	1.6	4.5	4.2
<b>61</b>	2.7	1.7	4.7	2.7	0.9	2.4	3.5	1.8
<b>62</b>	3.4	1.2	3.7	2.4	1.4	1.0	4.2	3.1
<b>63</b>	1.8	1.2	5.5	1.6	0.7	2.1	4.1	3.3
<b>64</b>	2.5	2.1	4.0	2.8	0.9	1.5	3.1	2.3



65	2.3	0.8	5.2	2.9	1.2	2.5	2.1	1.9
66	1.2	1.6	4.3	3.7	1.5	1.9	3.1	1.4
67	2.2	1.4	5.2	3.4	0.5	0.9	3.7	2.1
68	2.7	1.5	4.3	2.5	0.7	1.3	3.9	1.7
69	2.5	1.4	2.7	1.6	0.2	2.8	3.1	2.5
70	2.1	1.4	4.3	1.6	-0.6	1.1	2.0	2.0
71	3.2	1.8	2.4	1.8	0.4	1.1	2.7	3.3
72	2.3	1.4	3.4	1.9	0.1	1.9	2.9	1.1
73	1.7	1.7	3.8	3.4	0.4	1.8	2.9	1.9
74	2.2	1.2	3.6	2.2	-0.5	1.2	2.4	3.0
75	2.4	0.8	3.2	1.8	-0.3	1.4	2.5	2.1
76	2.0	1.0	3.2	1.1	0.9	1.7	2.8	2.3
77	1.3	1.0	3.3	0.7	0.1	2.4	2.3	3.5
78	3.1	1.3	2.8	0.8	0.5	2.0	2.1	2.0
79	1.9	1.4	2.5	0.8	-1.3	0.8	3.3	1.7
80	1.9	1.1	3.4	3.0	0.5	1.6	3.2	1.7
81	1.1	1.8	2.3	2.6	0.1	1.1	3.1	2.7
82	2.3	1.2	3.8	1.7	0.4	0.9	3.1	1.7
83	6.6	4.5	7.9	7.8	4.8	3.7	6.5	5.1
84	9.6	5.6	13.0	10.7	8.2	6.6	10.6	4.3
85	11.0	7.4	14.6	10.0	9.6	7.3	13.5	5.7

**Experiment A: Initialer Zeigefehler**

Aufgeführt sind die Mittelwerte (MWT) und die Standardabweichungen (STA) des initialen Zeigefehlers.

## Anhang B

## Initialer Zeigefehler

Gruppe Episode	kompovis		kompomec		dekovis		dekomec	
	MWT	STA	MWT	STA	MWT	STA	MWT	STA
1	-0.6	1.4	2.4	3.4	1.0	1.5	0.3	0.7
2	1.5	1.7	1.3	1.6	0.5	1.9	-0.3	1.8
3	1.0	1.3	1.7	2.7	2.4	4.7	0.5	1.8
4	2.5	1.6	1.7	2.4	2.3	3.0	1.3	1.2
5	0.2	1.3	0.6	2.1	1.2	2.2	1.2	1.7
6	0.1	2.2	0.0	0.9	3.0	4.1	1.7	0.8
7	53.7	2.5	-0.5	2.7	51.6	4.0	52.0	3.4
8	46.5	3.1	-1.7	3.5	33.2	5.5	44.1	6.6
9	30.7	19.0	1.7	3.2	30.1	5.7	37.1	8.8
10	26.5	19.3	0.0	4.5	25.5	7.2	29.9	10.4
11	25.2	16.7	1.4	2.4	21.2	7.7	29.0	10.8
12	20.3	15.4	-1.4	1.6	22.1	6.7	19.5	15.3
13	19.9	14.5	0.5	1.9	20.0	5.5	29.4	13.7
14	17.2	12.6	-0.2	2.7	17.3	7.2	20.7	7.1
15	16.5	11.9	-1.5	2.3	14.8	5.8	21.5	8.4
16	15.4	11.7	1.2	2.3	18.3	5.6	16.2	8.1
17	15.1	15.1	0.0	2.9	17.6	5.3	14.8	7.0
18	16.9	11.3	-1.9	3.2	15.2	4.1	17.0	5.4
19	11.8	11.3	1.0	1.8	15.4	6.3	16.9	7.0
20	12.8	11.7	0.7	2.7	11.6	4.4	12.9	11.5
21	14.5	7.0	0.2	1.9	15.0	8.6	10.8	11.2
22	10.4	8.9	0.2	2.1	15.4	10.1	10.4	9.7
23	13.0	7.8	-0.1	1.9	12.6	6.2	7.2	7.6
24	10.9	6.7	1.3	2.0	13.2	4.3	12.0	5.9
25	8.5	6.8	0.3	3.5	8.9	3.1	7.6	6.8
26	8.2	8.8	-1.8	2.4	8.2	4.2	10.7	2.8
27	9.3	6.7	-0.8	3.2	8.1	4.1	8.7	5.1
28	9.3	8.3	-0.9	2.9	7.7	4.0	4.6	14.2
29	9.0	8.6	-0.7	1.8	7.0	7.5	7.7	6.3
30	7.7	5.1	-0.2	1.5	7.1	3.9	5.4	10.3

<b>31</b>	8.0	5.4	-0.3	2.4	8.4	2.8	6.0	7.7
<b>32</b>	7.2	6.6	-0.9	1.9	7.2	3.9	7.8	8.2
<b>33</b>	6.3	4.7	-1.1	2.4	8.7	3.5	4.5	10.1
<b>34</b>	6.7	4.5	-0.7	2.1	7.8	2.2	9.2	3.2
<b>35</b>	7.8	6.2	-1.9	1.7	5.3	2.2	7.9	5.0
<b>36</b>	8.5	4.9	-0.6	2.4	5.8	3.6	5.6	9.4
<b>37</b>	9.0	11.5	0.2	2.4	11.6	5.6	12.5	11.3
<b>38</b>	15.5	12.0	0.6	1.9	11.1	9.5	15.8	19.4
<b>39</b>	17.6	12.5	-0.7	3.4	11.3	10.8	19.1	17.9
<b>40</b>	11.3	8.4	0.7	2.4	11.0	4.9	11.3	13.7
<b>41</b>	7.6	6.1	-0.4	3.8	9.4	4.9	6.7	11.8
<b>42</b>	6.2	6.5	0.2	2.3	6.3	1.8	7.0	2.7
<b>43</b>	10.4	9.9	53.5	7.6	22.1	7.2	-40.0	6.0
<b>44</b>	7.1	6.9	52.2	9.9	21.6	8.0	-21.9	10.9
<b>45</b>	7.6	4.9	42.7	18.4	12.7	3.4	-16.7	8.8
<b>46</b>	5.2	7.5	21.5	19.7	11.4	3.3	-12.6	3.5
<b>47</b>	6.2	5.8	22.2	16.7	9.9	3.4	-12.5	6.1
<b>48</b>	4.9	5.7	21.7	20.0	11.0	1.0	-11.0	4.4
<b>49</b>	5.2	6.4	20.2	28.1	10.0	3.5	-10.5	6.0
<b>50</b>	7.4	6.6	11.0	14.7	9.5	2.9	-7.6	4.1
<b>51</b>	7.0	3.8	21.8	24.1	8.3	3.4	-6.8	3.9
<b>52</b>	3.8	7.0	15.2	24.0	10.0	1.9	-5.5	4.4
<b>53</b>	7.5	3.2	14.5	15.5	6.7	2.8	-5.8	3.6
<b>54</b>	3.5	8.0	14.4	17.6	8.0	2.2	-3.9	2.3
<b>55</b>	6.2	3.1	13.2	15.4	7.9	2.4	-3.5	2.6
<b>56</b>	5.7	3.1	10.1	12.2	4.6	2.8	-4.4	2.6
<b>57</b>	6.3	3.6	10.8	11.5	7.5	4.5	-5.1	3.0
<b>58</b>	3.4	6.1	10.0	10.1	5.6	2.5	-2.8	2.8
<b>59</b>	3.7	5.1	12.5	9.1	5.8	1.4	-3.3	3.6
<b>60</b>	5.8	2.8	11.6	11.8	6.1	1.6	-3.0	2.0
<b>61</b>	4.0	5.9	8.4	9.0	6.8	2.7	-1.1	2.1
<b>62</b>	2.4	4.7	9.6	5.8	6.5	1.5	-2.8	2.8
<b>63</b>	7.6	6.0	6.6	6.1	7.1	2.5	-3.0	2.9
<b>64</b>	3.1	4.7	9.1	7.5	6.7	2.1	-0.9	3.7
<b>65</b>	5.5	5.0	4.8	10.9	8.5	1.8	-2.3	2.8
<b>66</b>	2.4	7.1	6.3	6.6	6.7	2.6	-2.2	2.6

<b>67</b>	3.8	3.2	4.1	8.2	4.3	1.9	-0.3	2.2
<b>68</b>	6.2	6.8	6.6	5.1	5.6	1.5	1.0	3.0
<b>69</b>	4.6	6.6	7.8	5.2	6.0	1.6	-0.5	1.9
<b>70</b>	5.1	4.3	3.0	10.1	5.7	1.6	-0.1	2.2
<b>71</b>	3.0	5.6	3.9	5.9	5.4	2.0	-1.2	1.8
<b>72</b>	1.7	6.0	3.2	6.2	6.1	0.9	-0.6	2.6
<b>73</b>	11.3	8.4	11.2	10.3	9.9	3.4	-4.2	3.5
<b>74</b>	8.0	7.9	17.4	12.2	13.9	5.8	-4.4	4.9
<b>75</b>	12.7	12.5	19.3	9.4	16.8	6.6	-1.8	3.7

**Experiment B: Initialer Zeigefehler**

Aufgeführt sind die Mittelwerte (MWT) und die Standardabweichungen (STA) des initialen Zeigefehlers.

## Lineare Distanz

Gruppe Episode	kompovis		kompomec		dekovis		dekomec	
	MWT	STA	MWT	STA	MWT	STA	MWT	STA
1	80.0	8.4	86.4	9.1	77.6	6.3	79.2	5.2
2	80.8	10.5	86.0	9.5	77.5	7.2	83.5	6.1
3	83.2	13.1	88.3	4.9	77.2	9.1	82.5	5.5
4	84.2	4.6	86.2	5.0	78.2	4.1	83.9	4.9
5	84.6	5.4	85.9	2.8	86.1	2.8	82.7	4.9
6	83.9	5.8	87.6	1.4	82.8	3.3	82.1	5.5
7	78.0	7.3	81.1	9.5	77.0	2.4	74.4	10.6
8	88.5	14.1	80.7	6.6	81.9	8.2	82.5	18.0
9	86.7	11.3	79.9	4.9	81.3	4.9	79.6	8.8
10	89.1	15.7	80.0	5.6	84.8	9.5	86.0	6.5
11	86.7	11.1	80.8	4.4	83.0	6.2	84.8	9.7
12	87.3	6.7	80.1	4.7	82.2	3.3	82.7	6.3
13	88.6	4.0	79.2	5.1	83.5	7.7	84.5	4.9
14	88.7	4.9	79.7	5.0	83.9	7.6	84.4	2.8
15	88.7	6.2	82.1	4.5	84.6	4.9	84.6	5.0
16	92.3	4.2	81.1	5.1	84.0	5.0	84.5	5.4
17	89.6	3.9	83.5	7.4	84.4	4.9	86.4	5.4
18	89.3	3.7	82.9	4.7	83.3	5.7	88.0	6.1
19	92.4	5.3	84.1	4.9	83.1	4.5	87.7	4.8
20	87.4	2.6	85.0	6.8	82.0	4.0	88.3	4.0
21	89.5	6.8	83.9	8.3	82.5	2.4	87.2	3.4
22	87.3	4.7	81.9	4.0	82.3	3.7	88.6	5.3
23	87.1	4.0	83.8	3.7	82.1	4.5	84.9	4.8
24	88.4	4.3	83.5	4.3	81.3	4.5	87.3	5.5
25	87.3	4.3	83.2	4.6	84.3	5.9	85.6	4.4
26	88.3	2.4	84.6	2.8	81.7	3.7	86.4	2.5
27	87.7	4.7	83.8	6.9	83.9	3.1	88.4	4.0
28	88.1	6.6	84.1	6.2	82.9	2.8	87.7	3.5
29	88.6	4.3	82.2	3.5	81.3	3.5	87.5	3.5
30	87.9	3.4	82.3	2.7	84.2	4.0	85.1	3.6
31	86.2	4.6	83.1	4.8	85.0	5.3	85.5	2.0
32	84.5	4.3	82.9	5.3	84.2	2.4	86.6	1.4

33	86.7	5.3	83.3	4.0	82.4	3.2	84.7	4.3
34	87.9	5.0	84.1	4.9	83.8	2.8	89.3	3.6
35	89.2	6.3	84.8	4.5	81.5	3.5	85.0	5.3
36	88.2	5.0	85.1	4.5	84.7	2.2	85.4	4.8
37	88.3	10.1	81.5	6.4	82.4	3.1	90.0	5.6
38	88.1	13.4	84.9	11.9	81.8	15.2	90.5	8.8
39	89.7	19.7	87.3	11.9	86.3	17.8	89.8	9.1
40	91.3	7.2	88.9	8.1	84.7	9.1	90.5	4.6
41	91.1	6.0	86.4	10.7	83.2	3.8	89.7	5.1
42	89.0	6.0	84.2	7.3	81.2	4.4	88.0	1.3
43	77.3	7.7	89.8	4.9	90.1	4.5	86.8	3.1
44	87.3	10.9	87.4	10.2	88.9	4.7	88.5	5.5
45	85.9	11.3	92.9	8.6	89.9	5.4	87.2	3.1
46	84.7	7.7	93.9	10.6	88.5	6.2	86.3	4.6
47	79.7	4.5	93.7	6.6	88.5	4.5	83.8	2.2
48	82.8	4.2	93.8	6.1	87.7	4.1	85.5	4.8
49	81.5	3.1	93.5	5.8	86.5	3.3	83.9	3.8
50	81.5	3.2	94.2	3.7	88.5	6.0	84.3	3.5
51	81.6	2.1	92.2	3.5	86.7	3.6	85.0	2.9
52	81.7	2.9	91.9	4.5	87.1	4.5	81.3	6.9
53	84.0	2.4	95.2	4.1	86.3	2.7	82.3	3.0
54	83.7	3.1	93.8	3.7	86.5	4.1	82.6	4.5
55	84.7	2.6	90.6	5.2	87.6	4.1	81.8	3.7
56	81.5	2.8	92.4	4.3	85.5	4.8	82.8	2.7
57	83.5	2.3	93.8	6.7	85.0	2.7	82.0	5.0
58	82.7	3.5	92.7	5.7	85.7	4.0	83.2	1.7
59	82.5	3.8	90.2	2.7	86.0	4.1	80.9	5.0
60	82.3	2.0	93.9	6.7	83.4	1.9	83.8	7.1
61	83.2	3.6	89.6	4.3	83.5	3.6	83.1	7.5
62	80.2	4.7	89.9	6.7	86.5	5.2	82.2	5.5
63	81.8	4.3	89.8	4.7	83.7	3.4	82.3	4.3
64	80.4	2.8	90.1	4.9	85.1	3.5	81.1	7.4
65	81.8	2.5	91.3	5.7	84.2	2.4	82.2	6.5
66	82.3	3.4	90.8	6.0	85.9	3.2	82.1	2.7
67	82.9	3.6	90.8	4.9	85.8	3.8	82.0	0.9
68	81.8	5.5	90.1	3.2	85.1	3.7	82.4	3.7

---

<b>69</b>	81.2	5.0	90.0	2.8	85.0	3.6	80.7	5.4
<b>70</b>	83.8	4.7	93.0	4.5	87.0	3.3	81.0	3.7
<b>71</b>	85.8	5.4	91.4	7.7	84.1	3.4	80.8	5.3
<b>72</b>	82.3	1.5	90.6	5.2	85.2	3.4	81.6	5.2
<b>73</b>	82.5	8.7	93.1	4.4	81.1	10.3	89.0	10.8
<b>74</b>	85.9	7.7	95.4	6.1	83.6	6.3	87.1	9.6
<b>75</b>	87.1	6.5	98.0	6.3	84.0	8.2	85.7	11.0

**Experiment B: Lineare Distanz**

Aufgeführt sind die Mittelwerte (MWT) und die Standardabweichungen (STA) der linearen Distanz.

## Maximalgeschwindigkeit

Gruppe Episode	kompovis		kompomec		dekovis		dekomec	
	MWT	STA	MWT	STA	MWT	STA	MWT	STA
1	433.0	57.2	528.5	70.2	440.6	93.7	471.1	67.7
2	477.4	134.7	527.7	117.6	446.8	94.4	472.0	67.4
3	463.7	100.5	509.2	95.3	485.7	114.9	484.6	88.7
4	479.0	137.8	490.1	68.5	491.7	90.5	488.0	67.9
5	527.3	116.0	538.2	64.9	569.0	157.2	501.8	74.5
6	565.6	98.2	526.3	85.4	516.5	128.2	470.4	54.6
7	411.3	142.9	579.7	183.3	503.3	152.5	435.5	155.5
8	443.7	122.8	631.1	172.5	527.1	162.4	532.7	171.6
9	431.3	124.0	622.1	146.4	564.1	167.0	492.8	122.4
10	500.6	189.8	682.0	226.3	581.1	166.8	519.0	80.4
11	473.9	136.7	602.2	180.3	622.6	221.7	487.8	86.8
12	480.9	129.2	585.4	118.2	634.0	242.2	589.4	101.2
13	476.3	118.8	610.4	188.8	620.6	176.2	577.1	60.7
14	454.3	96.1	642.6	202.9	640.1	184.0	605.3	79.8
15	471.5	111.1	604.6	196.7	605.7	100.4	584.8	77.3
16	485.7	91.6	608.0	206.7	615.3	127.4	539.3	82.9
17	465.7	80.5	668.6	241.2	617.7	119.5	536.5	85.4
18	488.6	83.0	640.7	181.7	633.4	147.5	587.3	104.0
19	524.1	68.0	650.9	147.7	603.2	72.6	599.1	69.2
20	471.7	54.9	660.9	154.0	577.4	73.7	634.9	82.8
21	452.4	58.8	679.5	185.3	610.9	107.4	602.1	40.1
22	449.9	72.0	679.9	94.9	588.9	82.0	584.6	73.9
23	451.8	85.0	710.7	134.8	553.3	87.9	630.5	124.4
24	446.7	94.3	674.7	140.2	577.4	113.4	632.3	96.2
25	441.3	83.8	682.8	114.0	595.8	178.2	615.5	111.5
26	457.9	78.4	712.3	149.4	602.5	136.9	586.7	89.8
27	488.9	77.5	711.7	99.6	646.4	164.4	666.5	86.5
28	498.7	115.3	766.8	118.4	653.2	156.1	635.9	114.3
29	482.4	97.2	669.1	75.0	684.4	132.0	658.4	87.5
30	483.1	80.8	648.8	61.4	625.8	158.4	627.1	98.9
31	462.2	80.7	643.9	89.6	646.4	154.4	630.8	90.8
32	470.5	76.4	668.7	81.2	667.9	133.5	669.6	123.7



33	476.0	90.0	655.9	87.9	639.9	143.5	634.1	88.9
34	463.4	83.9	663.6	38.3	634.8	131.5	640.3	107.1
35	479.6	71.1	689.1	76.6	656.8	195.7	684.5	132.2
36	499.3	78.7	690.0	90.8	625.5	164.7	666.8	101.3
37	506.0	97.9	688.0	91.9	610.0	105.5	679.9	127.6
38	504.7	88.1	739.2	158.8	639.5	162.8	738.2	119.9
39	509.5	115.6	758.9	123.1	659.7	137.4	723.7	118.0
40	495.2	75.4	762.4	115.4	650.0	97.9	683.3	103.5
41	528.7	79.8	791.0	98.9	620.3	82.4	650.3	108.9
42	514.5	98.2	758.6	140.3	644.8	136.5	692.0	111.7
43	500.1	145.3	810.9	62.8	517.2	86.4	634.0	115.8
44	610.5	177.0	786.5	95.6	553.4	64.0	679.4	120.1
45	602.7	162.8	809.3	118.1	570.2	74.7	718.3	161.1
46	644.3	205.5	803.1	116.9	574.5	92.4	680.5	122.2
47	576.7	179.2	800.9	60.1	573.9	93.2	619.1	112.2
48	580.6	164.7	785.2	63.1	607.6	90.8	632.0	50.4
49	618.4	204.4	783.4	94.2	548.2	65.3	659.6	81.8
50	598.2	184.6	813.2	131.4	571.3	67.3	626.0	68.4
51	554.6	152.6	756.8	102.1	534.0	78.5	654.6	65.5
52	589.1	164.2	783.5	81.3	535.9	53.5	677.0	90.7
53	592.5	184.4	837.2	116.5	544.9	80.3	656.7	118.2
54	572.5	176.6	783.9	60.8	547.0	81.2	707.6	124.4
55	568.0	157.8	764.1	119.3	513.9	46.8	673.4	136.8
56	551.2	165.2	767.7	87.9	512.6	80.8	675.6	133.8
57	579.3	173.0	784.9	108.8	524.2	53.5	682.3	121.2
58	573.9	183.9	793.3	111.7	486.5	98.0	692.7	121.4
59	573.2	202.4	817.2	127.0	473.7	74.4	666.0	112.1
60	599.5	241.4	791.2	97.7	439.7	67.9	672.0	98.8
61	581.4	195.2	775.0	131.1	448.4	74.5	665.8	114.1
62	573.7	137.9	728.2	133.1	500.9	80.9	638.6	99.0
63	586.7	231.8	728.7	131.5	477.9	81.6	678.0	125.8
64	561.6	156.6	730.3	128.5	503.2	102.4	661.2	133.6
65	587.5	133.3	767.6	121.8	498.6	91.8	665.1	131.3
66	613.0	197.9	736.1	157.1	478.0	97.0	656.5	177.1
67	620.7	243.7	749.3	139.8	497.5	73.6	636.6	191.7
68	607.9	194.6	766.2	142.0	473.8	82.4	623.2	132.7

---

<b>69</b>	568.5	184.4	739.8	129.8	490.3	83.0	587.0	102.9
<b>70</b>	603.5	221.1	777.1	160.0	495.1	107.4	592.0	111.1
<b>71</b>	643.5	241.9	734.0	162.4	481.7	93.0	589.2	80.1
<b>72</b>	632.0	234.0	727.7	161.7	492.4	104.2	631.6	172.5
<b>73</b>	668.7	214.1	795.6	114.2	472.4	91.5	739.7	89.4
<b>74</b>	682.4	228.3	804.7	124.2	449.6	83.2	732.1	51.9
<b>75</b>	690.4	202.9	822.3	150.9	490.5	116.6	729.9	59.8

**Experiment B: Maximalgeschwindigkeit**

Aufgeführt sind die Mittelwerte (MWT) und die Standardabweichungen (STA) der Maximalgeschwindigkeit.

## Kompositions- und Dekompositionsvorteil

	$V_{\text{komp}} [\%]$	$V_{\text{deko}} [\%]$
<b>Proband 1</b>	112.26	52.90.
<b>Proband 2</b>	91.01	70.85
<b>Proband 3</b>	100.39	93.44
<b>Proband 4</b>	131.17	68.94
<b>Proband 5</b>	91.58	75.11
<b>Proband 6</b>	59.80	58.63
<b>MWT</b>	97.70	69.98

**Berechnung des Kompositions- und Dekompositionsvorteils**

Aufgeführt sind die Werte jedes einzelnen Probanden und der Mittelwert (MWT) der beiden Vorteile.

## Anhang C

 $\Delta$ RMS-Fehler

Block RA-Art	1	2	3	4	5	6	7	
manuell KTR	1.8	12.9	6.4	7.3	7.0	5.7	5.6	MWT
	1.2	7.2	7.7	6.8	9.0	3.6	3.5	STA
manuell 90°	1.1	11.6	5.7	6.7	7.1	8.0	5.1	MWT
	1.6	9.0	7.2	6.5	6.5	6.8	3.8	STA
verbal KTR	0.6	-0.8	2.5	2.9	2.8	5.5	-0.4	MWT
	1.3	8.3	3.1	3.6	2.8	12.5	2.0	STA
verbal 90°	1.1	1.1	4.9	2.6	1.6	3.5	-0.3	MWT
	1.8	7.5	5.1	4.0	3.2	6.0	1.8	STA

**Experiment C:  $\Delta$ RMS-Fehler**

Aufgeführt sind die Mittelwerte (MWT) und die Standardabweichungen (STA) des  $\Delta$ RMS-Fehlers.

## Reaktionszeiten

Block RA-Art	1	2	3	4	5	6	7	
manuell KTR	537.5	565.5	563.3	506.1	519.1	527.4	532.4	MWT
	200.8	126.6	159.1	80.5	104.9	86.8	122.1	STA
manuell 90°	541.7	610.7	565.2	559.9	571.5	589.2	562.1	MWT
	85.1	132.1	105.0	87.4	100.3	142.5	102.5	STA
verbal KTR	619.2	740.7	762.6	724.5	731.8	737.6	755.1	MWT
	110.0	87.9	162.9	138.2	104.7	117.2	132.2	STA
verbal 90°	728.4	908.1	891.1	864.2	871.1	829.7	885.1	MWT
	103.4	114.4	117.7	132.8	118.8	126.4	162.5	STA

**Experiment C: Reaktionszeiten**

Aufgeführt sind die Mittelwerte (MWT) und die Standardabweichungen (STA) der Reaktionszeiten.

## Anhang D

 $\Delta$ RMS-Fehler

Block \ RA-Art	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
verbal vorab	0.3	7.3	2.7	2.7	4.2	1.7	2.9	1.4	1.4	0.2	-0.7	MWT
	0.6	14.1	4.0	4.4	5.0	1.9	2.4	2.9	1.6	1.2	2.0	STA
verbal KTR	0.5	8.0	2.5	3.2	2.7	1.7	0.5	0.7	0.9	0.0	-0.2	MWT
	1.0	9.1	4.4	3.7	4.0	3.4	1.3	1.1	1.7	0.9	1.4	STA
verbal leicht	0.7	3.5	2.1	-0.1	1.1	1.2	0.9	-0.5	-0.5	0.4	-0.8	MWT
	0.9	6.8	3.3	2.8	3.1	2.9	1.9	1.6	0.9	2.1	1.5	STA
verbal 90°	0.8	6.0	2.3	4.4	3.5	4.6	2.1	1.6	1.8	0.3	0.4	MWT
	1.0	7.0	5.4	6.1	4.4	4.9	3.5	1.8	2.4	1.5	1.9	STA
manuell leicht	0.7	10.9	6.6	7.1	7.5	5.0	5.9	3.2	2.6	3.2	1.1	MWT
	0.9	8.6	3.1	2.0	5.9	4.5	2.9	3.3	2.9	2.9	2.1	STA

**Experiment D:  $\Delta$ RMS-Fehler**

Aufgeführt sind die Mittelwerte (MWT) und die Standardabweichungen (STA) des  $\Delta$ RMS-Fehlers.

## Reaktionszeiten

Block \ RA-Art	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
verbal vorab	432.5	561.3	577.9	495.5	482.3	491.1	447.2	469.1	479	462.2	458.6	MWT
	61.2	197.5	235.9	110.6	113.3	53	73.8	70.9	93.2	87.3	59.22	STA
verbal KTR	552.6	694.5	638.8	621.2	581.7	595.3	634	593.8	612.5	591.1	584.9	MWT
	79.1	226	105.8	93.6	82	108.3	147.9	64	90.8	68.2	66.2	STA
verbal leicht	481.8	519.3	493.3	475.8	466	445.4	435.8	475.6	440.9	483.7	485.8	MWT
	112.2	113.6	99.3	80.9	63.1	63.7	23.9	79.7	61	66.9	96	STA
verbal 90°	813.9	887	814.6	776.2	757.9	718.9	708.4	758.4	763.1	736.7	769.2	MWT
	281.5	495.7	196.6	142.9	215.5	133.9	64.0	84.1	116.1	116.1	129.9	STA
manuell leicht	403.5	502.7	447.5	481.2	407.5	364.5	397.0	446.7	389.8	395.5	359.7	MWT
	86.8	136.3	86.8	154.9	77.6	46.5	61.4	81	64.2	81.2	64.5	STA

**Experiment D: Reaktionszeiten**

Aufgeführt sind die Mittelwerte (MWT) und die Standardabweichungen (STA) der Reaktionszeiten.

## Danksagung

An erster Stelle danke ich ganz besonders meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Otmar Bock für die Überlassung des Themas und die hervorragende Betreuung. Seine ständige Gesprächsbereitschaft war sehr hilfreich und ist nicht selbstverständlich.

Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr. Hans-Joachim Appell für viele Hilfen zwischendurch und für die Bereitschaft, die Arbeit als zweiter Referent zu begutachten.

Ebenfalls danke ich allen Kollegen aus dem Institut für Physiologie und Anatomie für die Unterstützung und die vielfältigen Hilfen. Ohne die Programmierung der Software, die technische Unterstützung und die ständige „Notfallbereitschaft“ von Lutz Geisen, Hartmut Schink und Irmgard Benick wäre die Durchführung der Experimente nicht möglich gewesen. Daher bedanke ich mich an dieser Stelle ganz besonders bei ihnen. Dem Leiter der feinmechanischen Entwicklungswerkstatt Martin Küsel danke ich für die Entwicklung und Anfertigung der Versuchsausrüstung für den Vibrationsaufbau.

Ohne die Anfangshilfe von Prof. Dr. Jean-Louis Vercher (CNRS und Université de la Méditerranée, Marseille) und die Leihgabe des Roboteraufbaus von Prof. Dr. Herbert Heuer (Universität Dortmund) hätten die Vibrationsexperimente nicht ins Leben gerufen werden können. Daher sei an dieser Stelle beiden gedankt.

Da eine solche Dissertation nicht ohne Probanden möglich ist, gilt mein Dank allen denjenigen, die sich in den Experimenten den verschiedensten Lernsituationen aussetzten. Vor allem denjenigen, die an den Vibrations-Experimenten teilgenommen haben danke ich besonders, da die Durchführung anstrengend und nicht immer angenehm war. Allen französischen Probanden danke ich für die Geduld und die Hilfe bei Sprachproblemen.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Diplomanden Isabella Gschwandtner, Susen Werner, Manuel Agostinho und Seung Soo Lee und bei den wissenschaftlichen und studentischen Hilfskräften Sonja Klippel, Stefanie Meuter und Felix Lünzner für ihre Mithilfe bei der Datenerhebung und der Datenanalyse.

Und natürlich danke ich ganz herzlich meinen Eltern und Geschwistern, Edzard Schönrock und meinen Freunden für unendlich viel Hilfe und Unterstützung jeglicher Art, ohne die diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Vielen Dank!

## **Lebenslauf**

### **Persönliche Daten**

Name Katja Pipereit  
Anschrift Aachener Straße 336  
50933 Köln  
Geburtsdatum 27.02.1976  
Geburtsort Osnabrück  
Familienstand ledig

### **Akademische Laufbahn**

1982 – 1986 Grundschule Hellern, Osnabrück  
1986 – 1988 Orientierungsstufe „In der Wüste“, Osnabrück  
1988 – 1995 Ratsgymnasium, Osnabrück; Abschluss: Abitur  
WS 1995/96 Immatrikulation an der Universität zu Köln  
Lehramtsstudiengang Sonderpädagogik mit dem Fach Englisch  
SS 1996 Immatrikulation an der Deutschen Sporthochschule Köln  
Lehramtsstudiengang Sport  
SS 1997 Wechsel zum Diplomstudiengang Sportwissenschaft  
SS 2001 Abschluss Diplom Sportwissenschaft  
SS 2002 Immatrikulation an der Deutschen Sporthochschule Köln  
Promotionsstudium  
WS 2004 Examensprüfungen Englisch und Erziehungswissenschaft

### **Studienbegleitende Tätigkeit an der Deutschen Sporthochschule Köln**

07/2000 – 08/2001 Studentische Hilfskraft am Institut für Sportsoziologie

### **Berufliche Tätigkeit**

09/2001 – 02/2003 Wissenschaftliche Hilfskraft an der Deutschen Sporthochschule Köln im Physiologischen Institut  
02/2003 – 08/2005 Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Deutschen Sporthochschule Köln im Institut für Physiologie und Anatomie

Köln, im Oktober 2005

---

Katja Pipereit